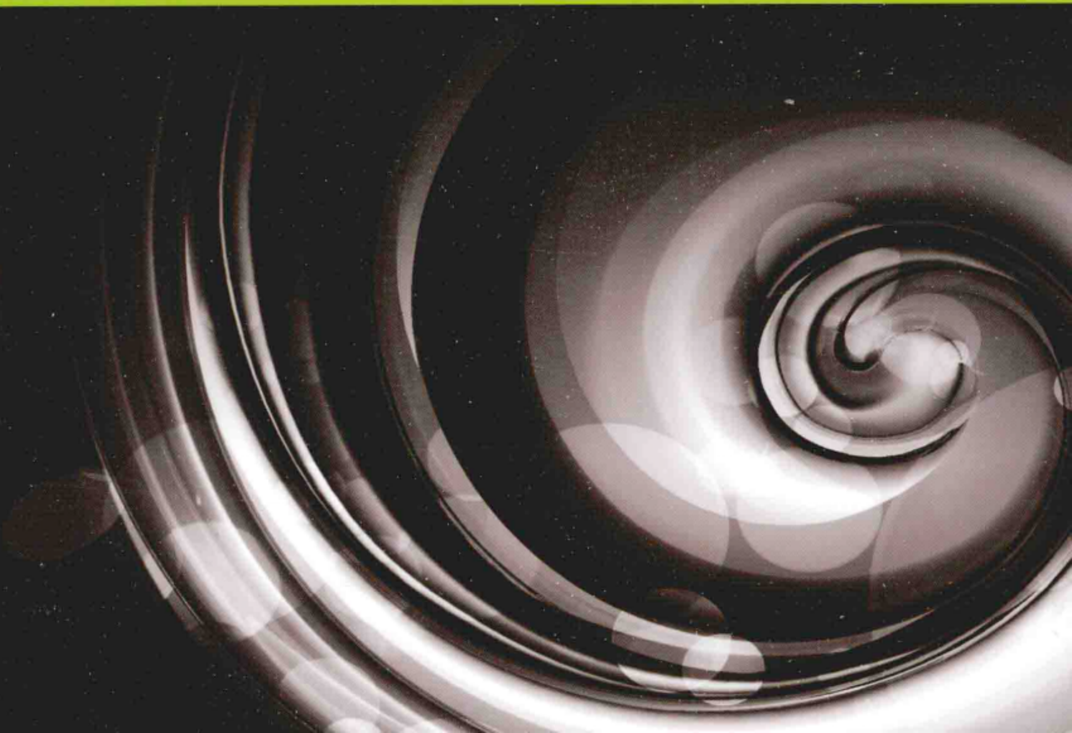
时间是假象吗？
时间具有相对性吗？
时间有方向、会流动吗？
时间的本质是什么？
时间旅行能够实现吗？
本书从哲学及自然科学的视角对这些问题进行了系统的论述，
相信您阅读过本书后定会获得对这些问题的全新理解！

李大庆 著

论时间及其本质

LunShiJianJiQiBenZhi



责任编辑：祝翠华
封面设计：尚荣荣

ISBN 978-7-5605-6090-8



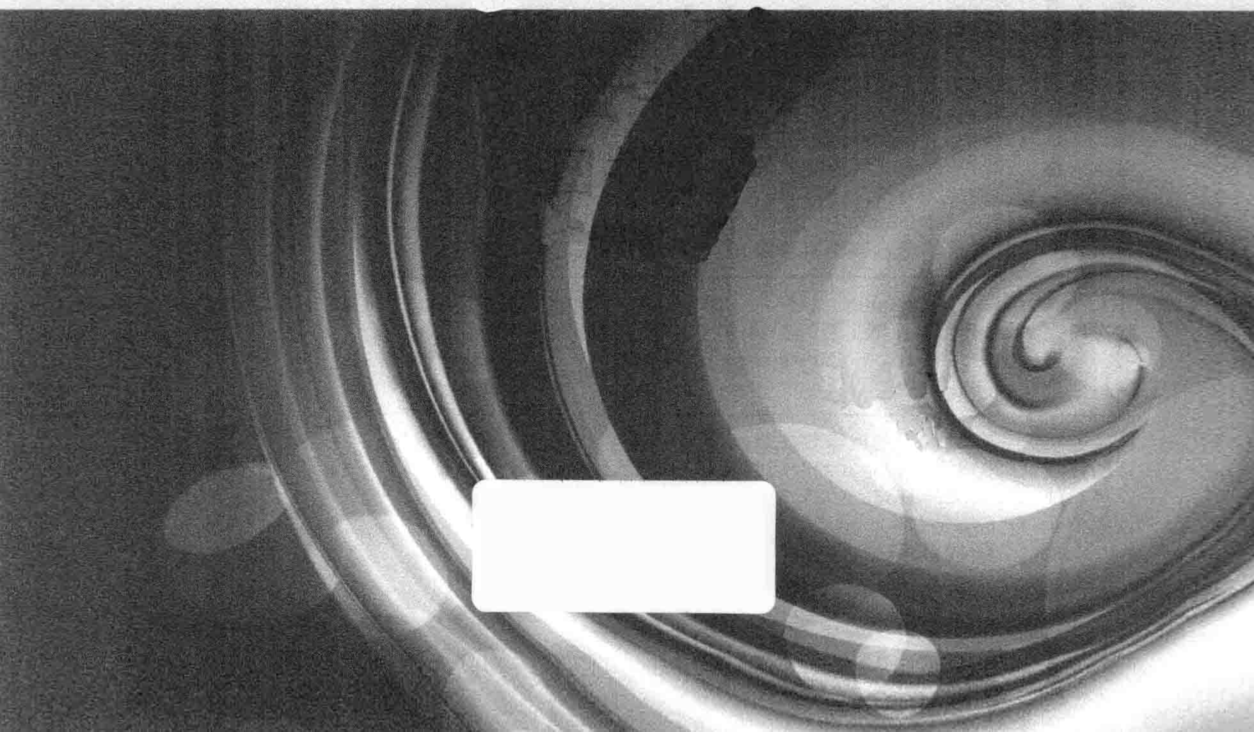
定价：48.00元

时间是假象吗？
时间具有相对性吗？
时间有方向、会流动吗？
时间的本质是什么？
时间旅行能够实现吗？
本书从哲学及自然科学的视角对这些问题进行了系统的论述，
相信您阅读过本书后定会获得对这些问题的全新理解！

李大庆 著

论时间及其本质

LunShiJianJiQiBenZhi



内容简介

本书通过对相对论及量子力学中与时间概念有关的各种效应(如所谓的时间膨胀效应及时间测不准关系)及概念体系的深入分析发现,现代物理学中对这些效应及概念体系的解释均不同程度存在问题,而正是这些不正确的理解将人们对时间本质概念的把握导向错误的方向,同时作者在讨论过程中发现了相对论及量子力学的时间概念体系不相容的根本原因。本书在提出对这些效应及概念体系全新理解的基础上对时间的各种性质进行了详尽系统的讨论,得到了一些与当前学术界公认的观点完全不同的重要结论:如时间的测量值(而非时间本身)具有相对性、时间不具有方向性及流动性等,而正是在这种新的概念体系中关于时间的各种悖论都得到了系统的解决,并且在此基础上提出了关于时间的本质的新定义。本书最后一章结合前面章节的结论对时间旅行的概念及可行性进行了详细讨论,得到了时间旅行的概念及方法是对相对论的错误理解的结果,是根本不可能实现的这样一个确定的结论,从而消除了各种想象中的时间旅行所导致的悖论。

本书适合于物理学及科学哲学专业的学生及研究人员阅读,也可作为哲学专业的学生及研究人员的参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

论时间及其本质/李大庆著. —西安:西安交通大学出版社,2014.4

ISBN 978-7-5605-6090-8

Ⅰ.①论… Ⅱ.①李… Ⅲ.①量子力学-研究 Ⅳ.①O413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 049913 号

书　　名 论时间及其本质
著　　者 李大庆
责任编辑 祝翠华

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号　邮政编码 710049)
网　　址 http://www.xjtupress.com
电　　话 (029)82668357　82667874(发行中心)
(029)82668315　82669096(总编办)
传　　真 (029)82668280
印　　刷 北京京华虎彩印刷有限公司

开　　本 727mm×960mm　1/16　**印张** 24　**字数** 457 千字
版次印次 2014 年 4 月第 1 版　2014 年 4 月第 1 次印刷
书　　号 ISBN 978-7-5605-6090-8/O·462
定　　价 48.00 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。
订购热线:(029)82665248　(029)82665249
投稿热线:(029)82668133　(029)82665375
读者信箱:xj_rwjg@126.com

前言

人类对时间的本质问题的广泛深入的思考自古希腊时期至今已有两千多年的历史,这期间讨论关于时间的本质问题的文章及论著汗牛充栋、数不胜数,特别是近一个世纪以来物理学的发展更是深刻揭示了时间的一些重要性质,但直到今天人类仍然无法真正理解时间的本质,甚至感觉对时间本质问题的理解更加紊乱、没有头绪。究其原因主要由于所有关于时间本质问题的论述,或者完全从纯粹思辨的哲学角度进行,如法国现象学大师埃德蒙德·胡塞尔在其《内时间意识现象学》中对时间的现象学的详细论述、德国存在主义大师马丁·海德格尔在其名著《存在与时间》中对时间的本质问题的论述等;或者单纯从纯经验式的科学视角进行,如英国科学家彼得·柯文尼及罗杰·海菲尔德在《时间之箭》中的论述、保罗·戴维斯在其《关于时间——爱因斯坦未完成的革命》中对时间的本质问题的论述等;很少有学者对时间的本质问题进行过全面的、综合性的思考。

科学特别是物理学凭借将时间概念的数学化实现了对物质变化过程的精确描述,而作为能够对最基本的物质变化过程进行精确描述的现代物理学最重要基础的相对论及量子力学,更是被物理学家认为揭示了关于时间的某些方面的最重要特征,而且这些理论中关于时间的所有表述内容都是解决时间的本质问题时必须首先面对的。由于相对论及量子力学为实现对最基本的物质对象的精确描述都各自使用了非常专业的数学工具,非专业人士理解起来异常困难,使得几乎所有完全靠哲学思辨探究时间本质问题的哲学家们因为理解上的困难,对于以相对论及量子力学为基础的现代物理学中所涉及的有关时间问题的各种结论的态度基本上是完全忽视、不予理会;而专业的物理学家则由于过分专注于物理学中数学的推理技

巧而完全忽视了对基本概念细腻的哲学思辨方法，因此在思考时间的本质问题时往往都会不假思索地直接引用相关的结论而不对其进行深入的分析。但如果哲学家因为理解上的困难而忽视物理学中用精确的数学语言描述的关于时间的重要结论，企图仅仅依赖人类的直觉以及哲学的思辨解决时间的本质问题，所获得的结论不可能是全面、可靠的。而如果科学家仅仅依赖物理学理论中关于时间的各种论述而不对其意义进行哲学方面的深入思考就妄下结论，则很容易造成对时间概念及时间本质理解的混乱；因此忽视自然科学理论中关于时间的某些重要内容的论述以及虽然重视科学理论中相关论述但不对相关概念进行深入的分析、思辨的做法都无助于对时间的本质问题的解决，更不可能获得关于时间的本质问题全面正确的结论。而由于相对论及量子力学过分追求理论的数学结构的美学特征而忽视物理概念上的严谨，特别是关于时间的重要特征的论述及相应的结论基本上都缺乏逻辑上的严格性，比如，在逻辑上"时间"与"物质完成变化过程所需要的时间"显然是两个意义完全不同的概念，但在物理学中如量子力学特别是相对论在相关论述中则往往将两者相互混淆、不加区分，并且爱因斯坦在由此衍生出的时间的相对膨胀、四维闵科夫斯基时空、四维黎曼弯曲时空等概念的基础上建立了狭义及广义相对论的理论体系，而相对论以之为基础的四维时空概念又将时间与空间完全对等起来，并最终导致许多主流物理学家因此认为物理学中所谈论的所谓的运动及变化实际上是完全不存在的现象，这些现象充其量仅仅是我们的幻觉，这样的结论显然是荒谬的，因为正是这样的结论又导致对整个物理学基础的否定并最终导致物理学的自我否定；又比如时间的方向与物质变化过程的方向是两个完全不同的概念，但物理学中在讨论描述物质的变化过程的物理方程的时间反演变换的操作性定义时，由于错误的理解而将两者相互混淆，由此获得的结论导致人们对时间本质问题的把握变得更加困难。正因为如此，有物理学家(如意大利物理学家卡尔罗·罗威利以及《时间之终结》的作者英国物理学家朱利安·巴布尔)为了一劳永逸地解决时间的本质问题给人类带来的烦恼，则依据正则量子引力方程的结构特点提出了"时间是不存在的"关于时间的理论，实际上这样做并没有从根本上解决时间问题，所有问题依然存在。因此，要正确理解时间的本质，搞清与时间相关的概念的涵义是绝对必要的，因此，必须对相对论及量子力学中相关的概念及结论进行深入的分析、梳理，使得我们能够从对时间的感性认识的角度系统地理解、把握这些概念，只有这样，我们才能系统地、一以贯之地理解、把握时间的本质问题。

由于物质的变化过程与时间之间具有密不可分的关系，而现代科学特别是现代物理学通过对各种物质的变化及其性质的研究似乎揭示了时间的某些方面的最重要内容，这些内容一方面对人类的时间观产生了深刻的影响，另一方面也使得对时间本质的理解更加困难。因此，要真正理解时间的本质，我们同样需要从对物质的变化及其各种性质的详细分析入手并寻找导致对时间本质问题的理解造成困局的根源。否则，如果仅仅单纯从时间的视角对时间的本质问题进行讨论，一方面使得所有论述的内容单调、空洞，另一方面如果不结合与时间有密切关系的物质的变化问题进行讨论，许多关于时间的重要内容将无法涉及，从而所有的论述将是残缺的、不全面的。

本书通过对当前科学仪器所能观察到的以及人类的感官所能感觉到的各种物质的变化过程的详细分析、思考，得出一切物质的存在及变化过程都具有时间性的重要结论。通过对狭义及广义相对论中因为参照系之间的相对运动或物体的质量所产生的引力场导致的物质完成其变化过程所需要的时间具有相对性以及时钟变慢现象的根本原因的深入分析论证，得出时钟变慢现象完全是由于三维空间从而空间中任意两点之间的长度或测地线的相对膨胀或弯曲（而非时间的相对膨胀或弯曲、更非同时性的相对性）导致时钟钟摆的摆动所经历的路径的相对增加从而钟摆完成其每一个摆动周期所需要的时间相对增大进而时钟钟摆摆动的频率相对减小、时钟相对变慢，从而导致一个参照系（包括惯性系及非惯性系）中时钟的计时单位相对于另一个参照系发生相对膨胀，并据此得到不同参照系中的观察者对时间进行测量所得到的测量值（而非时间本身）具有相对性的结论。而这一切与爱因斯坦的观点并不矛盾："相对论认为钟慢效应与尺缩效应对应，而我发现时间膨胀必对应长度膨胀……借助 $x=Ct$ 和 $x'=Ct'$，我们看到洛伦兹变换式本身已经包含了长度膨胀和时间膨胀，不用另行推导。长度膨胀和时间膨胀就是洛伦兹变换的物理本质①。"

其实，通过第 1 章 1.2 节中详细的讨论可以清楚地看到，在相对论中时间的相对膨胀甚至弯曲的假设从来没有得到任何理论及实验的证实，获得实验证实的都可以归结为物质变化过程需要的时间的相对增大，从而所谓的时间膨胀或弯曲并

① ［美］阿尔伯特·爱因斯坦. 相对论——广义与狭义相对论全集[M]. 易洪波，李智谋，译. 南京：江苏人民出版社，2011：76—77.

非实在意义上的而是虚假的、测量意义上的。实际上我们完全不需要时间相对膨胀的假设,仅仅凭借空间的相对膨胀或弯曲的概念就可以对相对论中的所有相关现象进行系统解释,也就是说爱因斯坦关于时间膨胀的假设是没有必要的,也是完全错误的。从而狭义相对论中所谓的闵科夫斯基四维时—空、广义相对论中所谓的四维黎曼时—空都仅仅是虚构的、测量意义上而非实在意义上的时空,因此相对论中涉及的所谓的四维时—空本质上而言都仅仅是满足光速不变原理或等效原理的、与一维时间加三维空间完全等效的空间结构。另外,通过对历史上物理学家探索、发现微观粒子的本质特性——波粒二象性——的过程的叙述并借助德国物理学家玻恩关于描述德布罗意物质波的波函数的几率解释分析、思考了粒子完成从空间中的一点到另一点的位置变化情况,推论出微观现象中物质完成其变化过程所需要的时间具有不确定性的结论,并据此反驳了物理学中关于量子化时空的观点,从而对海森堡的关于时间的不确定关系的意义有了更深刻的认识。通过对常用物理量的时间反演变换的操作性定义的详细分析,发现了所有物理教材或学术文章中介绍的关于时间反演变换的操作性定义实际上隐含了任何物理量关于时间的两种对称性变换:即物理量的时间反演变换及时间倒流变换,由此可见,当今学术界普遍采用的对物理量及物理方程的时间反演变换的方法是不正确的,时间反演变换并不会导致时间流逝方向的改变,从而包含相对论及量子力学在内的所有描述基本物质变化过程的物理方程具有时间反演变换不变性并不意味着对这些方程而言时间不具有方向性,而热力学系统变化过程的不可逆性、因果关系的单向性、电磁波在空间中的单向性传播以及宇宙大爆炸造成的宇宙空间的持续性膨胀等所谓的方向性也并非表征时间的单向性,而是相应的变化过程本身所具有的本质属性。另外,通过对物质变化过程的时间倒流变换这一新型的关于时间的对称性变换的详细研究发现任何物质的变化过程都具有时间倒流变换不变性,从而时间方向的改变不会对物质的变化过程产生任何影响,而且任何物理测量手段也不可能发现时间的反向流逝,也就是说时间的反向流逝没有意义,由此得到时间没有方向性从而不具有流动性的重要结论,而这些结论仅仅通过哲学的思辨是无法获得的。通过对物理学中涉及的关于时间的各种概念及理论内容的详细分析,就物理学中由于对时间的关系式的错误理解所造成的时间本质理解上的混乱进行了梳理,使得对时间的各种性质有了正确的、系统的理解,为最终彻底解决时间的本质问题奠定了重要基础。第 2 章则在第 1 章讨论的基础上结合哲学上关于时间的性

质的论述对时间的各种性质进行了详细的论述。而在第3章中我们结合前面几个章节中就物理学中关于时间的一些重要结论的分析获得的结论以及历史上一些著名哲学家关于时间的本质的重要论述对时间的各种性质进行了系统的分析，并由此得出了一些全新的结论，在此基础上结合人类历史上关于时间本质问题的重要论述提出了关于时间的本质的定义，这一定义完全凭借科学的结论及逻辑的推理是完全无法作出的。

在最后一章里，通过对时间旅行概念的叙述，详细分析了时间旅行所造成的各种悖论的原因及解决方案，通过对物理学中关于时间旅行的理论的分析并结合对物理学中关于时间问题的全新结论，提出物理学中关于时间旅行的实现方案的论述都是建立在相对论及量子力学对时间概念的错误理解的基础上，而根据时间的维度是"零"的假设证明关于宇宙的非时态模型也是不正确的，从而所谓的时间旅行是不可能实现的，所有关于时间旅行的想法都只是人类的美好幻想。可见，只有通过对科学中特别是物理学中所涉及的时间内容的详细、系统分析，修正科学理论中对时间概念的错误理解，才能对时间的概念及各种性质有正确的理解，而只有依据对时间概念的正确理解，才能真正把握时间的本质从而解决时间的本质问题以及关于时间的其他问题，由于时间概念是物理学中最基本的概念，因此正确理解时间概念对科学特别是物理学具有非常重要的意义，也只有正确理解了时间概念，才能正确理解与之密切相关的物理学理论特别是物理方程的真正意义。

由于本书是作者利用业余时间撰写的，因此整个写作过程历时长达两年半。而由于作者知识水平有限，书中错误在所难免，望读者批评指正。在本书的写作过程中我得到了许多人提供的帮助，在此我要对他们表示衷心的感谢。首先要感谢的是尊敬的陈建良先生，正是他对本书几年来持续不断地关注及鼓励才使我能从紧迫感转化为写作的动力并最终完成本作品，而正是他对本书出版资金方面的全力支持使得本书能够顺利出版；另外，对张军先生提供的帮助及所提出的意见和建议表示感谢；还要感谢我的其他同事、朋友的支持；当然更要感谢我的妻子应丽芬女士的理解和支持；没有这些，要完成本书的写作是不可想象的。最后还要感谢责任编辑认真细致的审阅、修改工作使得本作品的质量及可阅读性都有了大幅提高。

作者于无锡

2014年3月7日

目录

第 1 章

物质的存在及其变化过程所具有的最一般的性质

物质的变化是指物质的状态或者性质上的改变；而物质的存在则是指存在着的物质总会以某种方式向我们呈现从而原则上能够被我们的感官感知到或被我们相应的仪器检测到，按现象学的说法即存在就是“有”而非“无”。实际上，物质的存在及其变化是自然界中最为普遍从而也是最为我们熟视无睹同时也最令我们人类感到困惑的现象，我们每时每刻都能够感受到物质的持续存在及其变化的不断发生。而自古希腊起人类的智者就已经开始对这些现象及其背后的原因进行广泛深入的思考。如古希腊哲学家亚里士多德在其巨著《物理学》中就对物质的运动及变化进行了哲学思考，从而为其以后的科学哲学创立了一种典范，而由此衍生出来的真正意义上的物理学及化学则成为精确描述物质的运动及变化的科学。哲学及科学的研究发现，时间总是而且必定与物质的存在及其变化过程密不可分地交织在一起，而我们只能在意识中或者描述物质变化过程的科学理论中将二者进行想象性或假设性的分离及抽象，但完全无法在任何科学实验中将二者真实地分离开来。特别是我们对时间的感知及测量必须借助物质的存在及变化过程才能实现，就连时间的各种性质也必须在物质的存在及变化过程中才能够真正体现出来，因此对时间的本质问题的思考同样也不可能脱离而是必须在物质的存在及变化过程中进行。如存在主义大师海德格尔在其《存在与时间》中的研究表明：此在的存在具有时间性，而时间性的到时就是时间。由此可以说明时间与物质的存在之间的密切关系。近、现代科学特别是物理学则更是将时间作为描述物质变化过程的各种物理方程的一个最重要参数，而这些描述物质变化过程的物理方程真正呈现出了时间对物质变化过程的依赖。从科学的角度而言，由于时间的结构过于简单从而仅仅只能作为描述并且依赖于物质的存在及变化过程的一个最基本的对象及参数，因此我们永远不可能发现与物质的变化过程没有任何关系而仅仅只是用于描述时间之间关系的数学表达式，更不可能建立类似于研究空间结构的几何学那样的、专门用于研究时间结构或关系的关于时间的科学。对于时间的这种特征正如德国著名的科学家 F. W. 奥斯特瓦尔德所说：“时间的特性具有如此简单和明显的本性，以致不存在特殊的时间科学。我们需要就它了解的东西看来好像是物理学的一部分，尤其是力学的一部分。不过，时间在动学（phoronomy）中起着必不可少的作用，这是我们现在将要考虑的论题。然而，在动学中，时间好像仅仅以它的最简单

的形式作为单系列的连续流形出现[①]。"这就意味着我们不可能脱离物质的存在及变化过程而对时间及其本质问题进行抽象的论述，因此，要阐述关于时间的本质问题就必须借助关于物质变化过程的各种性质的研究结论，而下面将要分别展开讨论的内容均从某一个角度反映了时间的性质。历代科学家通过对物质变化过程的长期、广泛、深入的研究，积累了包括能够精确描述物质的变化过程的物理学（同时被一些学者称之为关于时间的科学）等在内的大量相关知识，但由于在研究过程中科学家们总是醉心于科学自身的逻辑、数学的结构以及精确的预言能力，而没有或者完全忽视对其中与时间相关的概念的深入分析，从而导致了对时间概念理解上的歧义。因此，除了尽可能地利用这些知识并对其进行详细的分析、甄别之外，还要修正存在于这些知识中可能对时间的本质问题的思考及论述带来混乱的内容，唯有如此，才能对时间的本质问题进行合理的论述并从中获得正确的结论。

1.1　一切物质的存在及其变化过程都具有时间性（即非瞬间性）

我们知道，随着时间的流逝，我们宇宙中的一切物质现象都处于永恒的变化过程之中。环顾我们周围的世界，没有也不可能存在永远不发生变化的物质形态。实际上，如果没有变化，整个宇宙及其物质就不可能存在，而一旦我们宇宙中所有物质的变化过程停止了，那么宇宙中所有物质结构就将顷刻间崩塌，所有的一切存在物都将归于乌有。从而一切存在着的物质的变化总是在永不停息地进行着，可以说物质的变化是宇宙中最普遍的现象，我们经常谈论并能够借助科学手段观察到的如宇宙的膨胀、天体的运动、星球的演变、太阳黑子的活动、地球火山的喷发、物态的变化、沧海桑田的变迁、生物物种的进化、生物个体死亡后被分解为分子及原子、地球上季节及气候的变化、地球上各种动物的季节性迁徙、掠食性动物在追逐猎物时狂奔、人类异性派对时激情的舞蹈等都是物质处于永恒变化过程的生动实例；而从古至今在人类文明发展进程中人们也总是在寻找各种方法、通过各种不同的方式描述着观察到的所有物质的变化现象，如在文学中印度诗人泰戈尔在其散文诗集《吉檀迦利》中对物质随时间的流逝处于永恒的变化之中的状态作了拟人化的描述："你没听见他静悄的脚步吗？他正在走来，走来，一直不停的走来。每一个时间，每一个年代，每日每夜，他总在走来，走来，一直不停的走来……"又如泰戈尔在其散文《昼夜》中对变化所作的生动描述："红日西沉，地平线上最后一抹金辉渐渐消失在暮霭的黑幔后面，夜阑姗姗来临了。白昼以光明，夜阑以黑暗，轮番地叩击我们的生活，在我们的心弦弹拨什么乐曲？日复一日，在我们中间创造的奇妙

① ［德］F. W. 奥斯特瓦尔德. 自然哲学概论［M］. 李醒民，译. 北京：商务印书馆，2012：89.

韵律，富于怎样深厚的意蕴？昼夜有规律的现隐，如同昊天的脉动，我们在其间成长起来。我们生活领域里难道不曾凝聚每日明暗转换的涵义？每年雨季，洪水淹没滩地，到了秋季，滩地从水中升起，为播种储存了足够的养料，雨季和秋季的往返，不曾在滩地一层层地撰写历史？”

还有其他无数的文学作品无不是在生动地描述着变化着的世界。音乐作品中如贝多芬的命运交响曲通过优美悲壮的旋律表达了人类命运的坎坷、多变，人生的辉煌、壮丽；此外还有其他艺术作品无不是在借助自己的方式描述世间万千的变化。而在科学中如牛顿力学借助牛顿三定律对物体的空间位移所作的精确描述、电磁学借助麦克斯韦方程对电磁场的变化过程所作的描述、广义相对论借助爱因斯坦引力场方程对物体在弯曲的黎曼空间中的运动所作的描述等。除了描述物质的变化，人们也一直在思考着关于物质变化的问题，如对于什么是物质的变化以及物质变化的恒常性与普遍性等问题，古今中外的著名学者或思想家就有过不同的阐释，如《周易·乾》中对变化的解释：“乾道变化，各正性命。”儒家学者在《礼记·中庸》如是说：“初渐谓之变，变时新旧两体俱有；变尽旧体而有新体，谓之化。”汉代贾谊在《鹏鸟赋》中则有：“万物变化兮，固无休息”。唐朝经学家孔颖达则解释道：“变，谓后来改前；以渐移改，谓之变也。化，谓一有一无；忽然而改，谓之为化”。近代史上著名的启蒙思想家梁启超说：“变者，天下之公理也”。英国博物学家赫胥黎在《天演论》中对变化的解释是：“一争一择，而变化之事出矣”；还说：“则天道变化，不主故常是正。”

而辩证唯物主义哲学家则通过对宇宙中各种物质现象的思考就物质的永恒的变化进行了一般性的概括：一切物质都是变化的，变化是一切物质的存在形式，不变只是相对的、表象的，变化则是绝对的、本质的，因此我们可以说物质的变化过程就是物质系统发生、发展、消亡的历史过程，从而物质的变化也可以定义为是物质的一个状态的消失及另一个状态出现（或者一个状态逐渐被另一个状态替代）的过程。对物质的变化，自然科学特别是物理学理论中的定义是：物质的变化本质上是物质状态的变化。而按英国哲学家J. R. 卢卡斯(J. R. Lucas)在其《时间和宗教》一文中的观点，关于物质的变化的定义可以简单地概括为：“如果在另一不同时间事物的状态不同了，那么它发生变化了。[①]”或者更确切地说，如果在不同时刻物质具有不同的状态，从而物质的状态在不同的时刻发生了变化，那么我们就可以说物质发生了变化，否则物质就没有发生变化。这也就意味着我们必须而且只能通过对物质在不同时刻的状态进行比较后才能获得物质的变化是否发生的正确结论，这一关于物质的变化的定义与以上所有相关的定义完全一致。由此可见，物质的运

① ［英］K. 里德伯斯. 时间——剑桥年度主题讲座[M]. 张邵增，译. 北京：华夏出版社，2011：151.

动或变化是具有时间性的而非瞬间性的，从而谈论在任何一个瞬间物质是否发生运动或变化的问题是没有意义的。物质的变化总是具体地表现为物质的空间位置、外部形态、微观结构、化学成分等的改变，而物质的空间位置的变化（即机械位移）是所有这些变化中最基本的变化形式，其他所有变化形式或者可以归结为或者起因于物质空间位置的变化。当然，在人类历史上对于我们的感官所感知到的物质的变化是否具有真实性，在哲学家及科学家中存在两种不同的看法。唯心主义哲学家认为，我们所看到的一切所谓的物质的变化过程都是幻觉，是完全不真实的现象；而唯物主义哲学家的观点则与此截然相反，除此之外，也有部分物理学家依据描述引力场中物质变化过程运动规律的广义相对论中四维时—空流形的概念提出：我们通常感觉到的所谓的物质的变化其实都是我们的幻觉，任何所谓的变化都是不存在的，从而任何物理量的值实际上都是不随时间而变化的这样一种观点。而关于一切物质的变化都是幻觉从而是不真实的这种世界观与我们的感觉经验完全矛盾，与一切实证科学特别是物理学的方法、前提条件及各种结论相冲突，这种观念产生的问题比解决的问题更多，因此，我们不可能坚持这种观念，实际上大多数哲学家及主流科学家也同样对这种观念持怀疑态度。

既然宇宙中一切物质都处于永恒的变化过程中，那么引起物质产生变化的根本原因是什么呢？物理学的研究告诉我们，任何物质系统之间都可以通过物质、能量及信息等交换而发生相互作用，其结果是发生相互作用的双方必然会产生相应的变化，从而任何物质系统的变化都是由于物质系统之间相互作用的结果，这就意味着相互作用就是物质系统产生变化的根本原因。就当前人类的认识能力而言，现代物理学已经证明自然界中存在四种最基本的相互作用力，并且自然界中所有物质系统之间的相互作用都可以归结为这四种基本的相互作用力，它们分别是万有引力相互作用、电磁相互作用、弱相互作用及强相互作用；这四种力的作用范围、作用强度、作用方式及作用对象都是不同的，从而某种作用力产生的结果是导致相关层次的物质单元发生相应的变化。如由于万有引力作用是长程作用，其作用结果导致了宇观层次的物质变化过程，主要表现为宇宙天体的空间位置的改变，当然其他相互作用的作用结果同样可以导致相应规模的物质产生空间位置的改变；电磁相互作用则是物质的状态、物理性质、化学结构从而化学性质等发生变化的根本原因；强相互作用则是导致原子核层次的物质发生裂变及聚变等变化的原因；弱相互作用的结果则是导致比如 β 衰变等物质的变化过程。而同样是这四种作用力，由于其作用范围、作用强度、作用方式及作用对象不同而导致物质变化的多样性及复杂性，如果按空间尺寸及涉及的物质单元的规模大小划分，物质的变化可以分为宇观层次的物质变化、宏观层次的物质变化、微观层次的物质变化等。宇观层次的物质变化包括宇宙的起源及演化，恒星系、星系团及超星系团等的形成及演化等。

现代宇宙学的最新观测数据表明，宇宙是在距今138亿年前的一次无可比拟的超级大爆炸中从“乌有”产生出来，在随后的时间里夸克、电子、质子、中子等构成宇宙中所有物质的最基本的物质单元被产生出来，而且直到今天科学家仍然能够观察到宇宙的微波背景辐射、宇宙的整体膨胀等宇宙大爆炸的遗迹或结果。宇观层次的变化还包括行星系（如我们的太阳系）、银河系及河外星系、星系团等的形成及演化等。科学家们经过长期的研究发现以上各层次的物质的相互作用以及由这些相互作用引起的相应的变化都具有规律性，并且这些规律可以借助各种科学的理论体系加以描述。宇观层次的物质的运动规律可以用广义相对论进行描述；而由于构成宇观层次的物质的次小单元是宏观层次，最小单元是原子、质子、中子、电子等微观粒子，所以对宇观层次的物质的变化的研究同样也离不开对其宏观及微观层次的物质的变化过程的描述。宏观层次的物质的变化包括声、热力、光、电磁、化学、生命等变化过程，这些变化过程可以借助经典物理学、化学及生物学进行描述。而由于构成宏观层次的物质的最小单元仍然是原子、质子、中子、电子等微观粒子，所以对宏观层次的物质变化的研究同样离不开对其微观层次的物质的变化过程的描述。微观层次的物质变化包括强子、轻子的生成及湮灭，光子的交换、吸收和辐射，原子核的聚变、裂变及衰变等变化，这些物质单元均表现出波粒二象性，其变化规律可由量子力学的薛定谔方程或海森堡的矩阵力学等进行描述。

我们知道，描述上述三个层次的物质的变化规律的最基础的物理理论是狭义、广义相对论及量子力学，而狭义、广义相对论及量子力学中描述相应的变化过程的最重要的方程都是关于时间的微分方程，这些微分方程本质上是用于描述某些相关的物理量在微小的时间段内所产生的相应的随时间而变化的微小变量之间的关系的等式，即方程中所涉及的物理量的任何微小的变化都是在微小的时间间隔内（而不是在瞬间或者零时间间隔内）产生的。其实在物理学的所有学科中所涉及的运动学及动力学方程几乎都是关于时间或时间的微分的等式，这也就意味着所有被物理学方程所精确描述或近似描述的物质完成其变化过程都要经历一定的时间间隔、从而具有时间性（其反义词是瞬间。在物理学中，时间性通常用时间间隔$\Delta t=t_2-t_1$或时间的微分$\mathrm{d}t=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\Delta t$进行量化表述），也即任何层次的物质的变化过程都不可能在瞬间（即零时间间隔）完成，即使是这一变化过程需要的时间非常短暂、进行得非常迅速，这一点已经得到了包括天文学、物理学、化学、生物学乃至考古学等各方面的科学观测的证实。如宇宙学家从天文学家的观测数据推断宇宙是从大爆炸中产生的，按我们星球上的格林尼治时间计时宇宙从诞生起到今天已经经历了138亿年之久的时间间隔，说明宇宙演化到目前的状态不是在瞬间而是经历了漫长的时间间隔才完成的，这是一个完全超出人类想象的时间段；构成包括我们的太阳系在内的所有宇宙天体的全部物质微粒都是在宇宙诞生初期于非常短

暂的时间内产生出来的，这即是说构成所有宇宙天体的微观粒子的产生过程也不是在瞬间完成的，而都是经过一定（也许非常短暂）的时间间隔才被全部产生出来的。又如地质学家通过测定地球土壤中的一些半衰期较长的放射性元素与其稳定的同位素的含量的比值确定地球的年龄大约为46亿年，这就是说地球从其初始的混沌状态演化到现在的状态经历了漫长的时间间隔，完全不是瞬间完成的；赖尔在其1830—1833年出版的《地质学原理》中首次引进了地球演化的思想，提出了地球缓慢进化的渐变性，实际上用科学的方法证明了地球的演变是经过了漫长的时间间隔而非瞬间完成的；又如通过对地球上的动物化石的年龄的测定可以确定如恐龙的化石已经经过了大约6000万年的时间，也就是说恐龙化石的形成不是瞬间完成的，而是经过了漫长时间间隔的变化过程才成为我们现在所看到的形态。

再比如一化学反应的反应物是H_2（氢气）和O_2（氧气），两种气体反应后生成H_2O（水），从一定质量的反应物H_2（氢气）和O_2（氧气）被置于同一个容器中开始到一定质量的生成物H_2O（水）产生出来为止，这一变化过程的完成显然也是要经过一定的时间间隔（也许这一时间间隔非常短）；又比如一个物体完成从一个空间位置到另一个空间位置的变化同样要经过一定的时间而不可能在瞬间完成。再比如许多微观粒子从产生到湮灭的整个变化过程都需要经过一定的（也许是非常短暂的）时间才能完成而绝对不可能在瞬间完成；否则，如果这些变化过程是在瞬间完成，也即是说如果某种微观粒子在产生的同时就湮灭了，那么这些微观粒子就无法对所有其他存在的物质单元产生任何形式的影响（当然也无法被任何科学的观察所证实），这样的粒子及相应的变化过程将如同完全没有存在或发生过一样，因此假设这样的粒子及相应的变化过程的存在没有任何意义。而对于那些远超出人类的感觉及想象范围的、变化速度非常快及存在时间非常短暂（甚至通常被认为几乎不需要时间）的物质形态，科学家们借助高速摄影机的帮助也能够发现这些过程仍然具有时间性。例如利用高速摄影机，科学家甚至能够拍摄到光子在非常短暂的时间间隔内的运动情况。当然，有人可能会提到所谓的突变现象，认为突变现象的存在说明有些物质的变化过程可以不需要时间。其实，理想的物质的突变现象从本质上说就是物质的质变临界点或者是转折点或特殊的节点。在突变论中常用折叠、尖顶、燕尾、蝴蝶、双曲奇点、椭圆奇点、抛物奇点等特殊的数学结构描述这样一些特殊的节点，也即突变从本质上来说就是物质变化过程中的其中一个特殊的状态，确切地说突变本身不是一个过程而是变化过程中的一个状态，虽然物质的变化过程在经过这一特殊状态时不需要时间，但物质的变化过程要达到这一特殊点必定需要时间和量变的积累，也就是说突变不可能在一个时间间隔中持续发生，即突变现象的存在并不意味有些物质变化的发生可以不具有时间性。而就真实的物质的突变过程而言，要完成整个突变同样需要时间，具有时间性，也就是说突变本

身就是一个非常短暂的过程。比如对于用炸药对矿山进行爆破这一过程而言，炸药爆炸从而矿石飞起的一瞬间就是突变，但人们使用高速摄影机对爆破进行摄影时会发现在炸药爆炸时矿石缓慢飞起的过程，即这里的突变本身也是一个过程，其发生也需要时间，只是这一时间通常非常短并且往往是不确定的、没有规律的，从而为了便于用数学模型进行处理往往假定在突变发生的节点上完成这些突变所需要的时间为零。另外，由相对论可知，当物体的运动速度接近甚至达到光速或者物体处于黑洞中这些极端情况时，相应参照系中的时间会停止。那么，在这样的参照系中的物体完成其任何变化过程仍然需要时间从而具有时间性吗？结论是肯定的，具体情况将在下面的章节中详细讨论。实际上，当我们对任何被描述的物质变化过程的状态进行比较时，时间性都会立刻凸显出来，从而凡是涉及变化都必定要涉及时间性。总之，任何物质在任何条件下其变化过程都具有时间性这一点得到了所有科学理论及科学观察的证实，具有普遍的意义。

上面提到的许多物质的变化过程（例如关于宇宙的产生及变化的整个过程）的时间性的实例大多是科学观察及推理的结果，有些甚至是我们从未感受过，同时也是远超出我们的想象力的具有时间性的变化过程，但这并不意味我们对物质的变化过程的时间性都只能依靠科学的论证及实验仪器的观测才能加以认识、把握。实际上我们每一个有正常感知能力的人每时每刻都在感受、经历着时间的流逝（为叙述的方便，在此暂且使用时间的流逝这一虽然有问题但非常形象的关于时间是如何显现出来的描述方式，关于时间的流逝问题下面的章节还将进行较详细的讨论），我们每个人自降生到这个世界起直至离开这个世界为止，都要经历婴儿、童年、少年、青年、壮年、老年的变化过程，在这整个变化过程中我们无时无刻不在感受周围所发生的各种各样的物质变化过程，而我们所感受到的所有这些物质的变化过程都要经历相应的时间。比如我们在少年时每天都在期盼长大、期盼长大后实现自己的理想，其中的原因是由于从小到大的成长过程是一个缓慢的生理变化过程，这一物质变化过程是需要经过一定的时间才能完成的；而我们的理想的实现也需要我们不断地进行知识及经验的量的积累最终达到质变的发生，这一变化过程同样需要经过一定的时间；再比如我们早晨醒来后起床、刷牙、吃早饭、而后去上班、上班过程中处理相关的各种事务、而后下班等等所有这些过程都需要经过一定的时间。又比如当心情极度沮丧时，我们听一首喜爱的乐曲，在听完整个乐曲后我们的心情可能会变得非常愉悦，这也就意味着我们的心情完成从沮丧到愉悦的变化过程也是需要经过一定的时间的，这种变化过程不可能在瞬间完成。特别是我们的一生都是在周而复始的期待、期盼、等待星期天（或发薪水的日子）这些特殊日子的到来中度过的，这里的原因还是由于要完成从一个星期天（或发薪水的日子）到下一个星期天（或发薪水的日子）的变化过程必须经历一定的时间，这一变化过

程不可能在瞬间完成，否则我们就不需要等待了；其实，我们的一生都是在等待、期盼、期待、焦虑、焦急、恐惧、担心等心情中度过的，如在上班时我们期待着下班、在饥饿时我们期待着赶紧吃上可口的食物、在与朋友约定好见面日期后我们急切地期待着这一日子的到来、当在漫漫旅途中徒步时我们期待着尽快到达目的地等，我们急切地等待、期盼、期待某些我们感兴趣的、能够使我们愉悦的、我们预期的事情发生（虽然我们可以创造条件使得变化过程进行得更快些，但却不能使变化的速度达到无限大从而使变化过程在瞬间完成，除此之外，我们所做的只能是被动地等待，等待我们预期的事情的发生），而对我们期盼的事情还没有出现感到焦虑，我们担心、恐惧某些可能对自己的身心造成伤害的、不希望出现的状况发生，我们所有这些心理状态的出现无不证明我们感受到的能够对我们的心理状态产生影响的物质的变化过程都是具有时间性的，而正是在这种等待、期盼、期待、焦虑、急切、恐惧、担心等过程中我们真实地体验到了所谓时间的流逝，体验到了物质的存在及其变化过程的时间性。即使是对人类的社会实践活动这样复杂的变化过程，由于这样的变化过程必须借助其他物质的变化过程的完成才能够实现，因此完成这类复杂的变化过程同样需要经历一定的时间。我们这里所谈论的物质变化过程的时间性与海德格尔在《存在与时间》中所谈论的此在的时间性的意义是一致的。如黄裕生教授所引用的海德格尔的观点："概括地说，将来就是已在的将来，因为生存性的将来总包含重演自身。而已在总要当前化为当前，因为已在作为'曾是且一直是'总是不得不有所是。将来、已在和当前的这种不可分割的统一性，就是我们所常说的时间性(Zeitlichkeit)[①]。"显然，海德格尔所说的时间性不可能是已在或当前或将来之中不相关联的某一个时刻，而是已在、当前、将来之中的某个时间间隔，而只有时间间隔才能够将三者关联起来，否则，就不可能将三者当做不可分割的整体看待。

由于任何物质的变化过程都具有时间性，因此时间 t 必定是描述相应的物质变化过程的物理量的自变量，从而原则上任何物理学方程必定可以表述为时间的一元方程形式。有学者通过对一系列物理学方程数学结构的考察发现："在数学意义上，物理过程的总的状态函数的最终的唯一的自变量是(时间) t[②]。"并由此作出了进一步的推论："唯一的终极的自变量就意味着唯一的原动力，因为任何其他的因素都要从时间那里取得自变量的函数关系，于是时间就从原来的数学参数跃升为控制一切物理过程的决定力量。按照这样的思路推理下去，一个事件的初状态和末状态都是在客观时间设定的轨道上演化，而且事件的任一状态都可以在时间

① 黄裕生.时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M].南京：江苏人民出版社，2012：96.

② 汪天文.时间理解论[M].北京：人民出版社，2008：315.

标注上找到相应的刻度，外部因素不容干涉，也无法干涉。退一步说，外部因素如果真的对系统进行干涉、更改，也是在时间的安排下进行的。可以说，这个系统是没有边界的，只有内部，没有外部，自本自根，无始无终，一切都在时间严格控制之下。时间似乎成了宇宙的灵魂，万物都在它的安排下，朝着既定的方向，按着预定的轨道演化，每一事件的发生都是必然的，因而是可以精确预知的[①]”，也就是说这种观点认为时间是物质的变化过程的原动力。而在历史上也曾经有科学家提出过类似的观点，并试图通过科学实验来证明其正确性，但最终并没有得到科学界的广泛认同，正如吴国盛教授在其著作中所述：“时间作为一个变化的动力源泉的概念，以前在自然科学中从未出现过，但本世纪则有物理学提出时间实体理论。1948年，英国天文学家邦迪(H. Bondi)、戈尔德(T. Gold)和霍伊尔(F. Hoyle)提出稳恒态宇宙模型，认为宇宙在膨胀过程中，由于物质不断随时间创生，其物质密度永恒不变，这实际上是以时间的创造和不均匀性代替物质和能量的守恒。50年代后期，苏联物理学家H. A. 科泽辽夫提出了一个时间实体设想，认为时间独立于物理世界存在，是物理世界运动和发展的动力源泉，科泽辽夫还提出实验来检验这个理论。后来证明，这两个尝试都没有成功[②]。”我们认为将时间看做一切物质变化过程的原动力的观点是不正确的，其根源在于这种观点的提出者并没有真正理解所谓函数关系中自变量的作用及意义。所谓函数关系即对两个集合Y和X，如果对X集合中的任何一个值x，集合Y中都有唯一确定的值y与之对应，那么就说Y与X之间存在函数关系，集合Y中的数值为函数，X中的数值为函数的自变量。显然，集合Y中的数值仅仅只是按函数所规定的方式跟随X集合中的数值进行取值而非受其控制，即自变量并非决定函数变化方式的力量。实际上，任何物理学方程必定可以表述为时间的一元方程的形式这一点完全不能够证明时间就是一切物理过程的原动力，充其量只是说明了一切物质的变化过程都随着时间的流逝按物理方程所规定的具体形式而变化，从而对变化过程起控制、限制作用的是函数关系或物理方程的具体结构而不是时间，即时间并不是规定一切物质变化过程的变化形式的控制力量从而不可能决定物理方程的形式。实际上，一切物质的变化过程是自发地而非时间迫使其发生的，在后面的分析中将发现，时间只是物质变化过程的性质。

前面提到过一切物质都是变化的，宇宙中不可能存在永远不发生变化的物质形态，变化是物质存在的最基本的形式，而物体空间位置的改变又是各种物质变化的最基本的形式，但人类文明并非一开始就认识到这一点。早在古希腊时期一些哲学家就认为必定存在绝对静止的物体，甚至认为地球是宇宙的中心、是绝对静止

① 汪天文. 时间理解论[M]. 北京：人民出版社，2008：315—316.

② 吴国盛. 时间的观念[M]. 北京：中国社会科学出版社，1996：254—255.

的，除我们居住的地球之外的其他所有的天体都围绕地球旋转，而且有哲学家企图通过逻辑的方法证明物体绝对静止的可能性，其中最著名的是古希腊思想家芝诺提出的逻辑证明，确切地说是关于物体绝对静止的悖论式论证，而飞矢不动悖论就是其中之一，这是一个至今仍然不断引起哲学家广泛讨论的话题。但如果对其进行详细分析就会发现，芝诺的飞矢不动悖论非但无法证明飞行的箭矢是静止不动的，反而可以成为物体的运动过程具有时间性的例证。下面我们对芝诺的飞矢不动悖论进行较为详细的分析。

所谓芝诺的飞矢不动悖论的大致内容是：因为当任何物体在占据了一个与其自身相等的空间时该物体必定是静止的，而飞行的箭矢在任何一个瞬间总是占据一个与它自身完全相等的空间，所以飞行的箭矢在任何一个瞬间都是静止不动的，从而飞行的箭矢永远静止不动。正如英国哲学家 R. L. 普瓦德万所说："这个悖论的要点是：当我们仔细观察运动时，我们会发现运动只是物体的一系列状态，在每个状态中运动的物体只不过处于空间的一个位置。这些状态单独不能算作是运动，可是当我们把每一个状态都描述完时，也就没有剩下什么东西可用来描述一个运动。因此，运动本身好像消失了①。"实际上，只要我们对物体的运动过程进行详细的描述，就必然会导致理解上的困惑，其原因如法国哲学家亨利·柏格森在其著作中所进行的详细说明："理解是一系列连续的位置：先到达一个点，然后是下一个，再然后是另一个。我们能对这样一种理解提出一个异议，即在这些点之间发生着某些事情吗？它迅速增添新的点，因此有着无限的延续。在过渡中，它转移着自己的视线。如果我们坚持，就会发现它是为流动性安排的，在随着位置的增加而变得日益狭窄的间歇中，这种流动性重新生长、回来、离开，最后在无限小的地方消失。……在那里，我们不会在运动中看到一系列的位置，那里只有一个点；运动的连续性于是在与每个位置相对应的瞬间分解了。但是，时间的片刻与移动的位置只不过是被我们的理解所捕捉的瞬间，这个理解即运动的连贯性和持续性②。"那么我们应该如何理解飞矢不动悖论呢？显然，作为一个完整的推理过程来说，芝诺在论证过程中所列举的大小前提均是正确的，特别是飞行的箭矢在任何一个瞬间只占据了一个空间位置从而的确是静止的，但关键在于并不能因此就简单、直接地作出飞行的箭矢是静止不动的推论，通过下面的详细分析可见芝诺作出结论的理由是不充分、是违反了充足理由律的。

我们知道，包括物体的运动在内的任何物质的变化过程都具有时间性、都必须经历一定的时间间隔才能够完成其过程，而在任何一个瞬间物质只能有一个而非

① [英]R. L. 普瓦德万. 四维旅行[M]. 胡凯衡，邹若竹，译. 长沙：湖南科学技术出版社，2005：160.
② [法]亨利·柏格森. 思想和运动[M]. 杨文敏，译. 合肥：安徽人民出版社，2013：6—7.

两个或两个以上不同的状态(如任一时刻运动的物体只能有一个确定的空间位置,至少对宏观现象而言是这样),从而根据物质变化的定义可知在任何一个瞬间物质的状态是没有变化发生的(如在任何一个瞬间运动的物体是静止不动的),这一点与任何物质的变化过程都具有时间性的观点完全一致。虽然在任何一个瞬间物质都只能有一个确定的状态从而没有变化发生,但我们并不能因此下结论说在任意两个不同的瞬间物质的状态同样也不会有任何改变(每一个瞬间物质的状态既是前一个瞬间状态变化的结果又是下一个瞬间变化的开始),而这才是问题的关键。根据前面提到的哲学家卢卡斯关于事物变化的定义,我们只能而且必须通过对两个不同瞬间物质的相应状态的比较而非仅仅由任何一个瞬间物质的状态来确定其是否发生了变化,换句话说,只有在任意两个不同的瞬间(而非任何一个瞬间)物质的状态都没有发生任何可以观测到的改变的情况下,才能够下结论说变化确实没有发生,反之则发生了变化。由于任何物质的变化都不可能在瞬间发生,即运动物体的空间位置的任意微小变化都必须经历一个时间间隔才能够完成(即 $S=Vt$),从而飞行的箭矢的任何空间位置的变化都不可能在瞬间完成,因此,在任何一个瞬间飞行的箭矢必定是静止的(虽然如此,但飞行的箭矢在任何一个瞬间仍然具有惯性或者运动的趋势)。显然,对于飞行的箭矢而言其状态具有两个显著特点:首先,该箭矢在任何一个瞬间只有一个空间位置从而是静止不动的(这种描述方式被称做运动的静态描述方式);其次,该箭矢在不同的瞬间处于不同的空间位置上,也就是说飞行箭矢的空间位置确实发生了变化,因此根据物质变化的定义可知该箭矢不可能是静止的。也就是说飞行的箭矢是否在运动的结论不能够仅仅从箭矢在任何瞬间(是否处于运动)的状态作出,而是必须从对不同的瞬间箭矢所在的空间位置是否发生了变化的判断、比较中得出。芝诺在证明过程中只是一味地强调飞行的箭矢在任何一个瞬间静止不动的特征,而完全没有提及或有意掩盖飞行的箭矢在不同的瞬间所处的空间位置是否有所不同的情况。可见,芝诺在推理过程中只列举出对其有利的证据而对不利的证据则避而不谈,也即并没有列举出所有的证据来支持其结论,从而芝诺的推理不可能得到正确的结论。

芝诺的箭矢不动的完整、正确的推理应该是:由于箭矢在任何一个瞬间都只有一个空间位置从而是静止不动的,而如果在任意两个不同的瞬间箭矢的空间位置也没有发生任何改变,那么箭矢必定是永远静止不动的。可见由箭矢在任何一个瞬间都是静止的这一前提条件没有而且也无法必然地推论出该箭矢是静止的结论,即箭矢在任何一个瞬间都是静止的这一条件仅仅是该箭矢是静止的这一结论的必要条件而非充分条件。因此,芝诺关于飞行的箭矢是静止的这一所谓的悖论其实不应被称做悖论,充其量只能说是一个依据并不充分的证据得出错误结论的证明。可见,芝诺的飞行的箭矢不动的悖论实际上反证了物质(状态)的变化过程

(而非物质的每一个状态本身)都具有时间性,从而在任何瞬间物质都处于静止状态的观点。

上面的分析虽然消除了芝诺的飞行箭矢静止不动的悖论,但在论述过程中却出现了另一个令人深感困惑的问题:由于飞行的箭矢在任何一个瞬间都是静止的,而在不同的瞬间该箭矢却出现在不同的空间位置,那么飞行箭矢又是如何从空间中的一点到达与之不同的空间中的另一点从而实现飞行的呢?这一问题可归结为箭矢的飞行是如何可能的问题。需要说明的是,仅仅借助对箭矢飞行过程的逻辑的或简单数学的分析无法证明其飞行是如何成为可能的,因为分析只能告诉我们与任何一个不同的瞬间相对应的不同空间位置上飞行的箭矢都是静止的,即分析最多只能告诉我们飞行的箭矢在某一瞬间处于某一空间位置上,而在下一个瞬间则处于另一个空间位置上,根据物体的运动或变化的定义可知,由于飞行的箭矢在不同的瞬间其空间位置已经发生了变化,从而飞行的箭矢不是静止不动的,但飞行的箭矢是如何实现从空间中的一个位置移动到下一个位置这一点仅仅借助逻辑的或简单的数学分析是无法证明的。对于这一问题,物理学在动力学意义上可以给出解释。

在物理学中通常采用某些物理量如惯性质量、能量、动量等来描述运动的物体所具有的从空间中的一个位置移动至下一个位置的能力,从而表明运动的物体在空间中的每一个点上都具有运动的趋势或能力使其可以从空间中的一个位置移动到下一个位置,但却从未而且实际上也不可能提出过物体为何具备这种能力的证明。对此,辩证法(包括唯物辩证法)则具有自己独到的见解,相应的解释首先由黑格尔所提出:"运动的意思是说:在这个地点又不在这个地点;这就是空间和时间的连续性,并且这才是使得运动可能的条件[①]。"辩证法的这种解释其实完全是类比数学分析的精确表述作出的,即在任何一个瞬间物体在相应的空间位置上虽然是静止的,但根据数学分析中的极限概念我们可以明确地知道物体正以确定的速度离开该空间位置,从而在任何一个瞬间物体在相应的空间位置及其无限小邻域内必须被看做处于运动状态,正是在这个意义上可以下结论说物体在任何一个瞬间既静止同时又在运动。这种解释意味着可以将需要经过一个时间段才能够发生的状况移植到一个瞬间,即认为变化不仅仅可以在一个时间段上发生而且可以在瞬间发生而不需要时间,从而在任何瞬间就存在变化的"因子",这样就可以使得原本在任何一个空间位置上静止的物体"动"起来。显然,这里的瞬间必须被理解为动态的而非静态的瞬间,理解为位于该瞬间附近并且正在不断趋近于该瞬间、处于正在消失中的无穷小邻域,必须而且只能在这样的瞬间,物体才能既处于空间中的某

① 吴国盛.自然本体化之误[M].长沙:湖南科学技术出版社,1993:91.

一位置上同时又不在(或正在离开)该空间位置上,这也就意味着必须在空间与时间的连续性的概念基础上才能理解运动现象,唯有如此,运动或变化的可能性才是可以理解的,否则相应的结论就会与物质变化的定义、与一切物质的变化过程都具有时间性的事实相矛盾。由于运动或变化本身就具有连续性,而静态的分析都要将对象进行剖析(对运动或变化而言是要将其分割为每一个瞬间的状况)从而从静态的角度看待它,但我们根本无法穷尽从而实现对例如一条与连续的实数集对应的直线的连续性分割,这本身就与运动或变化是矛盾的,从而运动或变化如何成为可能的必须借助极限的概念、借助数学分析这一工具才能进行分析。另外,在此需要强调的是后面将要进行分析的芝诺的阿基里斯悖论其实也突出反映了物质的变化过程具有时间性的观点。从上述分析过程中可以发现,即使是一个无穷小的运动过程同样也需要时间、需要与之对应的无穷小的时间间隔,而非完全不需要时间,即并非完成这样一个无限小的运动路程所需要的时间为零。所有上面列举过的包括这里未提到的以及将来可能被科学家观测到的现象都向我们或者将要向我们证明,一切物质的变化过程都具有时间性,确切地说一切物质完成其变化过程都需要时间。

除了上面所涉及的一切物质的变化过程具有时间性之外,笔者的观点是一切物质存在的过程同样具有时间性。这里所说的物质的存在是指该种物质处于三维空间中的某一位置上并且与其他物质之间存在相互作用,从而原则上能够凭借感官或仪器观察到该物质,同时也能够通过对该物质与其他物质之间的相互作用所产生的对其他物质的影响间接观察到该物质从而确定该物质的存在,这与传统形而上学的观点是完全不同的。正如黄裕生教授在其著作中所说:“传统形而上学以之为对象的‘存在’是被抽掉了时间(Da)从而是与人相分离的自在存在,因而是抽象的‘纯粹存在’。正因为存在被抽掉了时间,它才被形而上学一直当做是永恒的在场,并且是一切存在者的根据……当形而上学谈论存在时,存在一词所说的实际上不再是存在本身,而只不过是一个最高的存在者,更确切地说,只不过是一个更高概念。……作为形而上学对象的存在只不过是人的表象思维的产物,更确切地说,只是哲学家思维的概念设定。因为正是哲学家在谈论存在时,遗忘或抽掉了时间,而这种没有时间没有机缘的存在只不过是思维中的概念①。”

也就是说传统形而上学所说的永恒的、与时间无关的所谓物质对象的“纯粹的存在”仅仅只是存在于人的思维之中的概念,而非物质存在的本质特征,这也就意味着现实世界中真实的物质的存在必定与物质的变化过程、与时间有密不可分的关联。我们知道,一切物质都是而且只能以变化的形式存在着,从而物质存在的过

① 黄裕生.时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M].南京:江苏人民出版社,2012:12.

程就是其变化的过程，而状态的变化则总是存在着的物质状态的变化，存在是处于变化过程中的物质的存在，而物质的变化过程同样也是存在着的物质的变化过程，正如德国存在主义哲学家海德格尔所说的"存在总是存在者的存在，而存在者总是存在着的存在者"，从而物质的存在与其变化过程相互交织、无法分离，我们无法从物质中分离出永远不发生变化的恒常的、纯粹的存在，也无法分离出能够脱离存在的永恒的、纯粹的变化过程。而任何物质的本质形态的变化都有一个量变的积累过程，在量变的积累没有达到质变的规定时，物质的本质形态不会产生质的变化，从而我们仍然可以将该物质称做是其自身，即该物质存在着。例如某人在从出生到长大乃至衰老的过程中所有发生的一切都可以看做是量变的过程，如果在这一过程中量的积累还没有达到质变的规定，例如还没有发生从有生命特征到无生命特征的转变，从而我们可以说此人仍然是此人；又如恒星在其核聚变反应还能持续进行、从而维持其内部的高温并因此产生能够与其引力平衡的向外膨胀的压力时恒星不会产生质的变化，即我们仍然可以将其称做原来的那颗恒星。而当物质的本质形态的量变的积累达到、而且最终必定能够达到质变的规定时该物质的本质形态即发生变化，就物质的该种形态而言可以说物质的形态已发生了本质的变化，该物质已经不具有原来的物质形态，从而作为原来的物质形态而存在的物质已经不存在。如人、动物等从生到死的转变，粒子从产生出来到衰变为其他粒子，恒星从诞生出来能够发出星光到最终因为引力坍塌形成与之完全不同的黑洞这种星体的转变等等。这就是说因为任何物质都是不断变化的，而任何物质的变化都有从量变到质变的过程，而且物质的变化都具有时间性，从而任何物质形态的存在也具有时间性，即物质的变化过程的时间性完全等同于物质存在的时间性。由于物质开始存在或存在结束都是以物质的本质形态的质变为标志的，而质变也是物质的变化形式，确切地说是物质特殊的变化形式，因此物质存在的时间性与其变化过程的时间性是完全一致的，或者说物质存在的时间性就是物质变化过程的时间性，因此谈论物质的变化过程的时间性等同于谈论物质的存在的时间性，即关于物质的变化过程的时间性的各种结论同样适用于物质的存在的时间性。关于存在的时间性问题德国存在主义哲学家海德格尔在其哲学巨著《存在与时间》中进行了详细而深刻的论述，在论著中海德格尔将存在归结为此在（是指具有意识的"我"），从而将存在的时间性归结为此在的时间性。按海德格尔对此在的时间性的看法，"也就是说，此在有死，即此在能觉悟或领悟到死亡而把死亡作为可能性来生存，因而此在才有时间性。而死（对此在而言）是命定的，因而此在的存在具有时间性也是命定的事实[①]。"在海德格尔的论述中显然是将此在的生与死作为一个最重要的内容对

① 黄裕生.时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M].南京:江苏人民出版社,2012:112.

待的，并认为此在是把死作为可能性来生存的。显然，当此在在把死只作为可能性来生存时说明此在还处于有生命（即未死）的状态，没有发生死亡这一质变，而此在由生到死的转变又需要经历一个量变积累的过程从而绝对不可能在瞬间发生，这一变化过程本身就具有时间性，由于此在是一直伴随着这一变化过程而存在的并且与这一变化过程没有发生哪怕任何短暂的分离，因此此在的存在同样具有时间性，而此在也正是通过自己亲历的时间性见证了周围与其一同相伴而存在的事物存在的时间性的。正如黄裕生教授在其著作中所述："从本源的时间性（不管是本真的时间性还是非本真的时间性）角度而言，虽然有非物理时间的东西存在，却并不存在无时间性的东西。因为任何存在者，不管是作为其自身存在，还是作为某种什么而存在，都是从时间性以当前样式统一到时为前提，也就是以'让……来相遇照面'为前提，这绝不是认为时间先于存在或优越于存在。我们只是从时间性到时的角度去说明'如何有（给出）存在（Wie gibt es Sein）？'时，存在才以时间性的到时为前提。但是，如果我们'倒转'过来，从存在的角度去说明'如何有（给出）时间（Wie gibt es Zein）？'那么时间倒是以存在为前提。在海德格尔看来，存在必得借时间显示出来，而时间则必得作为存在的显示或放出（Ekstase）而到时[①]。"

可见，海德格尔在其《存在与时间》中同样而且只能通过物质变化过程的时间性来理解、把握物质存在的时间性。因此，可以得出任何物质的存在都具有时间性从而不存在任何无时间性的事物的结论。

综上所述，可以得出一个重要结论：**一切物质的存在及变化过程都具有时间性——即非瞬间性**，任何物质的变化，无论其量值是多还是少，都必须至少经历一个有限的时间间隔才能发生。而下面我们将要讨论的物质的存在及完成其变化过程所需要的时间具有相对性和不确定性，则是物质的存在及变化过程具有时间性的具体表现。也就是说任何物质的变化过程都是从未来还未发生到现在正在发生再到过去已经发生过的、逐渐展开的形式向我们呈现的，而绝对不可能像任何物质对象那样直接将整个变化过程作为整体呈现在我们的眼前。这一结论适用于宇宙中（包括宇宙自身）所有已经观察到以及还未被观察到的物质变化过程。可以设想如果宇宙中所有物质的存在及变化过程都没有时间性，那么宇宙中所有原本需要无限的时间才能完成的不同的存在及变化过程会集中在某一瞬间全部完成，果真如此那么任何物质的存在及变化都不可能呈现出来，也就不可能有所谓的存在及变化发生，因为变化根本就没有时间发生或者来不及发生，这样，变化的开始就意味着结束从而使得变化的初始状态、结束状态完全无法区分，从而也就无所谓变化，同时物质的存在也将成为不可能的事。可见，物质变化过程的时间性并非通过

---

① 黄裕生．时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M]．南京：江苏人民出版社，2012：146．

外部赋予的形式获得的，而是其本身就具有的；反之，如果物质的变化过程本身就没有时间性，那么我们不可能通过引入一个外部时间使得变化过程获得时间性。狭义相对论告诉我们，任何物质的相互作用的传递速度不可能超过光速，从而任何物质系统对其他物质的相互作用不可能在瞬间完成从而都需要一定时间，这样，在出现的同时就即刻湮灭的物质现象不可能对现实世界中存在的其他所有物质产生任何可以观察及测量到的作用，因此仅仅存在（或发生）于某一瞬间的物质及其变化过程不可能被任何科学仪器检测到，这样的物质的存在及其变化是不可想象的，并且也是不可能发生从而没有任何意义的。从而物质的存在及变化过程的时间性能够使得物质的存在及变化的过程得以延展开来并加以实现，就如同机械波把空间中某一点（即振源）上的机械振动在空间中延展开来从而使得我们能够在远离振源之处间接地、清晰地观察到这一机械振动一样。

1.2　一切物质存在的时间间隔及其完成确定的变化过程所需要的时间间隔具有相对性

通过上面的讨论我们知道，一切物质的存在及变化过程都具有时间性，而物质的变化过程都可以看做是在特定参照系中发生的，那么发生在不同参照系中的同一物质的变化过程相对于所在参照系中的观察者所需要的时间有什么关系呢？不同参照系中的观察者对同一物质变化过程所需要的时间进行测量得到的**测量值**之间又有什么关系？在下面的讨论中将根据狭义相对性原理、光速不变原理以及等效原理等研究分析在某一参照系中的观察者对在不同的参照系中所进行的关于某一物质变化过程的理想实验，以及不同参照系中的观察者对关于某一物质变化过程的理想实验的观察结果，通过严格的推理得到了物质完成其变化过程所需要的（而非任何其他意义或形式的）时间间隔以及对时间间隔的测量值具有相对性的结论，并据此否定了当前被人们广泛接受的相对论中关于“时间膨胀”这一似是而非的错误结论，同时使用由于相对运动造成的三维空间的相对膨胀以及物质的质量导致的三维空间的相对弯曲这些相对论中原有的概念体系，系统地论述了相对论中关于时间的各种问题，所得结论与相对论理论体系完全一致。

1.2.1　对于发生在不同惯性系中的同一物质变化过程，该变化过程从发生到结束所需要的时间间隔具有相对性

现在我们来作几个在不同参照系中所进行的同一物质变化过程的理想实验，并通过这些理想实验对关于不同参照系中物质完成其变化过程所需要的时间之间存在的关系的分析作出重要结论，同时以这些结论为出发点对相对论中的时间膨胀及时间弯曲等关于时间的相对性的概念进行详细讨论，澄清其中的似是而非的

观念,从而能够使我们更正确地理解相对论中与时间有关的所有重要结论的意义。

【理想实验1】该理想实验所用实验装置由光脉冲发射—接收器P(或P′)及平面镜J(或J′)构成,将光脉冲发射—接收器P(或P′)与平面镜J(或J′)放置在同一个台面上,使得P(或P′)的发射(及接收)孔A(或A')的轴线与J(或J′)所在的平面垂直,发射(及接收)孔A的轴线与平面镜J(或J′)交于B(或B')点,A(或A')点与B(或B')点之间的距离为L;制作两套完全一样的这种实验装置,其中一套实验装置(由光脉冲发射—接收器P与平面镜J组成)放置在参照系K中(如图1-1所示),另一套实验装置(由光脉冲发射—接收器P′与平面镜J′组成)放置在参照系K'中(如图1-2所示)。假设参照系K(简称K系)与参照系K'(简称K'系)均是惯性参照系,K系与K'系之间的相对运动的速度为V,两个参照系中的实验装置的放置使得P(或P′)的发射(及接收)孔A(或A')的轴线与速度V的方向垂直。实验内容是测量一束光脉冲完成从光脉冲发射—接收器P(或P′)垂直射向平面镜J(或J′)再由J(或J′)垂直反射回P(或P′)(并被P(或P′)接收),这一变化过程所需要的时间间隔及运动路径的行程。显然,这是分别在两个不同惯性参考系中所进行的两个完全相同的理想实验,因此可以看做分别在两个参照系中所进行的同一个实验。

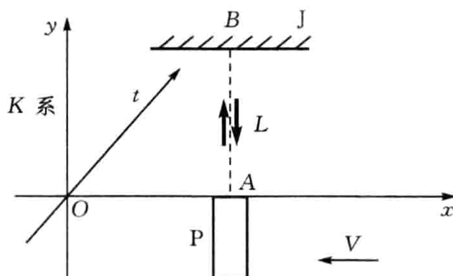


图1-1 K系中的观察者测量K系中的光脉冲从P—J—P所需要的时间间隔的理想实验

K系中的观察者观察到的在K系中进行的实验的具体情况如下:一束光脉冲从光脉冲发射—接收器P垂直射向平面镜J再被J反射回P,光脉冲从光脉冲发射—接收器P到平面镜J再被J反射回P的行程为$2L$(如图1-1所示)。由相对性原理及光速不变原理,K系中的观察者用相对于观察者静止的时钟测得的K系实验装置上产生的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器P到平面镜J再被J反射回P的这整个行程$2L$的变化所需要的时间间隔$2\Delta t$(显然,这里的时间间隔Δt使用的时钟的计时单位就是K系中的观察者使用的K系中的时钟的计时单位,与K'系的观察者使用的K'系中的时钟的计时单位是不同的,因此需要特别标注出来,

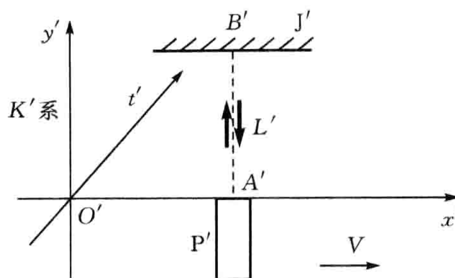


图 1－2　K'系中的观察者测量K'系中的光脉冲从 P′—J′—P′所需要的时间间隔的理想实验

这一点在以往所有相对论物理教材及论著中都未得到关注，假定 K 系中的时钟的计时单位为 1 s(K)，即 K 系中的 1 秒)是：

$$2\Delta t = 2L/C \quad s(K)$$

即

$$\Delta t = L/C \quad s(K) \tag{1.1}$$

在此，区别标注不同参照系中计量单位的必要性在 1.2.2 节关于不同参照系(如 K 系与 K')之间的计量单位的换算的叙述中可以明显地看出。显然，K 系中的观察者使用所在参照系中的量杆测得的放置在 K 系的实验装置上产生的光脉冲从光脉冲发射—接收器 P 到平面镜 J 再被 J 反射回 P 相对于 K 系中的观察者的运动行程 $2L$(与时间间隔 Δt 类似，在此假定 K 系中的观察者使用的量杆的长度单位为 1m(K)，即 K 系中的 1 米)是：

$$2L = 2C\Delta t \quad m(K)$$

即

$$L = C\Delta t \quad m(K) \tag{1.2}$$

K'系中的观察者观察到的在K'系中所进行实验的具体情况是：一束光脉冲从光脉冲发射—接收器 P′垂直射向平面镜 J′再被 J′反射回 P′，光脉冲从光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′再被 J′反射回 P′的行程为 $2L$(如图 1－2 所示)。这样K'系中的观察者用相对于观察者静止的时钟测得的K'系实验装置上产生的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′再被 J′反射回 P′的这整个行程 $2L$ 的变化所需要的时间间隔 $2\Delta t$(显然，这里的时间间隔 Δt 使用的时钟的计时单位其实是K'系中的观察者使用的K'系中的时钟的计时单位，与 K 系的观察者使用的 K 系中的时钟的计时单位是不同的，假定K'系中的时钟的计时单位为 1 s(K')，即 K'系中的 1 秒)是：

$$2\Delta t = 2L/C \quad s(K')$$

即

$$\Delta t = L/C \quad s(K') \tag{1.1a}$$

在此需要指出的是公式(1.1a)的形式与(1.1)完全相同，但在公式(1.1a)中K'系的观察者使用的计时单位与K系的观察者使用的计时单位是完全不同的。显然，K系中的观察者使用所在参照系中的量杆测得的放置于K'系的实验装置上产生的光脉冲从光脉冲发射—接收器P′到平面镜J′再被J′反射回P′相对于K'系中的观察者的整个行程(与时间间隔Δt类似，在此假定K'系中的长度单位为1m(K')，即K'系中的1米)是：

$$2L = 2C\Delta t \quad m(K')$$

即

$$L = C\Delta t \quad m(K') \tag{1.2a}$$

在此需要指出的是公式(1.2a)的形式与(1.2)完全相同，但在公式(1.2a)中K'系的观察者使用的长度单位与K系的观察者使用的长度单位是完全不同的。

另一方面，由于K系与K'系之间存在相对运动，K系中的观察者观察到的在K'系中进行的实验的具体情况与图1-2中发生的情况完全不同，即在K系中的观察者看来，光脉冲所经历的路径已经不是图1-2中所发生的情况：一束光脉冲从光脉冲发射—接收器P′垂直射向平面镜J′再被J′反射回P′，光脉冲从光脉冲发射—接收器P′到平面镜J′再被J′反射回P′，根据运动的合成与分解法则，该观察者观察到的实际情况如图1-3所示：一束光脉冲在图1-3中的位置①处从光脉冲发射—接收器P′垂直射向平面镜J′，由于在光脉冲射向平面镜J′的过程中整个实验装置也以速度V相对于K系向右运动，从而当光脉冲到达平面镜J′时平面镜J′已不在原先的位置①处，而是运动到了图中所示②所在的位置；当光脉冲在位置②处被平面镜J′反射而还未到达光脉冲发射—接收器P′的过程中实验装置整体仍以速度V相对于K系向右运动，从而当光脉冲到达光脉冲发射—接收器P′时光脉冲发射—接收器P′已不在位置②处，而是运动到了图中所示的③所在的位置。这样，光脉冲从光脉冲发射—接收器P′射出后到达平面镜J′再被J′反射回P′(相对于K系)的运动路径是一条折线$A'''B''A'$，显然折线$A'''B''A'$的总长度比图1-2中的$2L$变长(膨胀)了，即光脉冲相对于K系的运动路径与运动速度V的方向及P′到J′的垂线构成两个直角三角形(如图1-3中的$\Delta A'''B''A''$及$\Delta A''B''A'$)，可见由于相对运动，对于K系中的观察者而言，图1-2中的线段$A'B'$已经成为图1-3中的线段$A'''B''$，即已经不是“竖线”而是变为一条‘斜线’。这样K系中的观察者用相对于观察者静止的时钟测得的K'系实验装置上产生的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器P′到平面镜J′再被J′反射回P′相对于K系发生的这整个行程$2L'$的变化所需要的时间间隔是$2\Delta t'$(这里使用的是K系中的计时单位s(K)，下

列等式中涉及时间的量必须使用相同的计时单位及长度单位才能得到正确的结论)，则有：

$$L'^2=(C\Delta t')^2=L^2+(V\Delta t')^2$$

$$\Delta t'=\frac{L/C}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\ \mathrm{s}(K)$$

$$=\frac{\Delta t}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\ \mathrm{s}(K)$$

即
$$\Delta t'=\frac{\Delta t}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\ \mathrm{s}(K) \tag{1.3}$$

这里的 $\Delta t'$ 及 Δt 是 K 系中的观察者用相对于观察者静止的时钟的同一个时间计量单位测得的时间值，因此具有可比性。显然，$\Delta t'$ 大于 Δt，即 K 系中的观察者用相对于观察者静止的时钟测得的 K' 系实验装置上产生的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′再被 J′反射回 P′相对于 K 系的这整个行程 $2L'$ 的变化所需要的时间间隔 $2\Delta t'$ 较 K 系中的观察者用相对于观察者静止的时钟测得的 K 系实验装置上产生的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P 到平面镜 J 再被 J 反射回 P 的这整个行程 $2L$ 的变化所需要的时间间隔 $2\Delta t$ 变大了，或者更确切地说 K 系中的观察者用相对于观察者静止的时钟测得的在 K' 系中的物质完成某一变化过程所需要的时间间隔较 K 系中的观察者用相对于观察者静止的时钟测得的在 K 系中的物质完成同一变化过程所需要的时间间隔变大了。显然，公式(1.3)只与光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P(或 P′)到平面镜 J(或 J′)再被 J(或 J′)反射回 P(或 P′)的位置变化所需要的时间间隔有关。

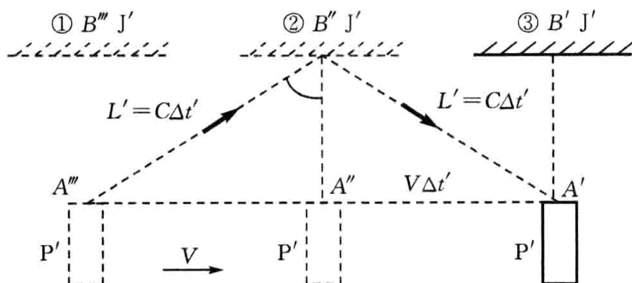


图 1-3　K 系中的观察者测量 K' 系中的光脉冲从 P′—J′—P′所需要的时间间隔的理想实验

另外，从图 1-3 中可见，相对于 K 系中的观察者，K' 系实验装置上产生的光脉冲从光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′再被 J′反射回 P′的运动路径实际上是

两个直角三角形的两条斜边 A‴B″及 B″A′，较光脉冲从光脉冲发射—接收器 P 到平面镜 J 再被 J 反射回 P 的运动路径(图 1－3 中的直角三角形的直角边 A″B″)明显增大。显然，相对于 K 系中的观察者，K 系中的观察者使用所在参照系中的量杆测得的 K' 系实验装置上产生的光脉冲从光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′再被 J′反射回 P′的整个行程是 $2L'=2C\Delta t'$，即有：

$$2L'=\frac{2C\Delta t}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\quad \mathrm{m}(K)$$

$$=\frac{2L}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\quad \mathrm{m}(K)$$

即

$$L'=\frac{L}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\quad \mathrm{m}(K) \tag{1.4}$$

这里的 L' 及 L 是 K 系中的观察者用相对于观察者静止的、具有同一长度单位的量杆测得的长度值，因此具有可比性。显然，L'大于 L，即 K 系中的观察者用相对于观察者静止的量杆测得的 K' 系实验装置上产生的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′再被 J′反射回 P′相对于 K 系的运动路径的行程 $2L'$较 K 系中的观察者用相对于观察者静止的量杆测得的 K 系实验装置上产生的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P 到平面镜 J 再被 J 反射回 P 的运动路径的行程 $2L$ 增大了，或者更确切地说 K 系中的观察者用相对于观察者静止的量杆测得的在 K' 系中物质完成某一变化过程所经历的路径较 K 系中的观察者用相对于观察者静止的量杆测得的在 K 系中物质完成同一变化过程所经历的路径增大了。【理想实验 1】也可以借助洛伦兹变换进行分析，在参照系 K 及 K' 中建立坐标系如图 1－1 中的(x,y,t)及图 1－2 中的(x',y',t')所示，则光脉冲从光脉冲发射—接收器 P 刚产生出来这一事件以及光脉冲到达平面镜 J 这一事件由 K 系所在坐标系进行描述分别为(x_1,y_1,t_1)及(x_2,y_2,t_2)，如果用 K'系所在坐标系进行描述，其坐标分别为(x'_1,y'_1,t'_1)及(x'_2,y'_2,t'_2)，其中 $x_1=x_2$，$y_1=y'_1=0$，$y_2=y'_2=L$，$L=C(t_2-t_1)$。显然，由洛伦兹变换可得：

$$x'_1=\frac{x_1-Vt_1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$$

$$t'_1=\frac{t_1-Vx_1/C^2}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$$

$$x'_2=\frac{x_2-Vt_2}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$$

$$t'_2=\frac{t_2-Vx_2/C^2}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$$

因此有

$$
\begin{aligned}
x'_2 - x'_1 &= \frac{V(t_1 - t_2)}{\sqrt{1 - V^2/C^2}} \\
&= -\frac{LV/C}{\sqrt{1 - V^2/C^2}} \\
L' &= \sqrt{(x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - 0)^2} \\
&= \frac{L}{\sqrt{1 - V^2/C^2}} \\
\Delta t' &= t'_2 - t'_1 \\
&= \frac{(t_2 - t_1)}{\sqrt{1 - V^2/C^2}} \\
&= \frac{L/C}{\sqrt{1 - V^2/C^2}} \\
&= L'/C
\end{aligned}
$$

这里的结论与上面的分析所得结论完全相同。由于洛伦兹变换本身就是相对运动的两个参照系中的观察者关于发生在其中一个参照系中确定的空间及时间坐标上发生的某一事件的联立的空间—时间的坐标之间的变换关系，而且空间及时间的洛伦兹变换都仅仅是整个洛伦兹变换的一部分，因此各自只有在整体洛伦兹变换中才能获得完整的物理意义。这样，在应用洛伦兹变换对【理想实验 1】乃至任何其他的物质变化过程进行相应的分析时必须同时考虑事件的空间及时间坐标的洛伦兹变换，并将二者结合起来综合考虑(特别是在对普通机械时钟的情况进行类似的分析时，必须同时考虑时钟的指针所经历的极其复杂的路径，以及指针完成这一路径所需要的时间)才能得到正确的结论并获得相应的意义。正如在数学中解方程组时必须将方程组中的全部方程都结合起来考虑才能获得正确的答案一样，抽象的洛伦兹变换同样只有在具体的物质变化过程中才能获得相应的物理意义，而通常情况下人们所做的仅仅只是考虑时间的洛伦兹变换，并由此推论出与由物质的变化过程所经历路径的相对增大而导致的该变化过程的完成所需要时间的相对增大完全不同的所谓时间的膨胀，因此，这样的结论显然是片面的、不可能正确的。实际上，以上分析所得到的结论如公式(1.3)及(1.4)具有普遍意义，为进一步证明这一结论的普遍性，我们再来分析讨论另外一个类似的理想实验。

【理想实验 2】实验用的实验装置由光脉冲发射—接收器 P(或 P′)及平面镜 J(或 J′)构成，将光脉冲发射—接收器 P(或 P′)与平面镜 J(或 J′)放置在同一个台面上，使得 P(或 P′)的发射(及接收)孔 A(或 A')的轴线与 J(或 J')所在的平面垂直，发射(及接收)孔 A 的轴线与平面镜 J(或 J')交于 B(或 B')点，A(或 A')点与

B(或 B')点之间的距离为 L;制作两套完全相同的这种实验装置,其中一套实验装置(由光脉冲发射—接收器 P 与平面镜 J 组成)放置在 K 系中(如图 1-4 所示),另一套实验装置(由光脉冲发射—接收器 P′与平面镜 J′组成)放置在 K'系中(如图 1-5 所示)。假设 K 系与参照系 K'系均是惯性参照系,K 系与 K'系之间的相对运动的速度为 V,两个参照系中的实验装置的放置使得 P(或 P′)的发射(及接收)孔 A(或 A')的轴线与速度 V 的方向平行。实验的内容是测量一束光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P(或 P′)垂直射向平面镜 J(或 J′)再由 J(或 J′)垂直反射回 P(或 P′)(并被 P/P′接收)这一变化过程所需要的时间间隔及运动路径的长度(路程)。显然,这同样是分别在两个惯性参考系中所进行的两个完全相同的理想实验,从而可以看做是分别在两个参照系中所进行的同一个实验。

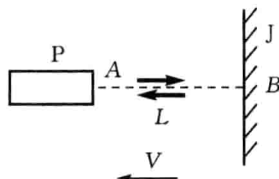


图 1-4 K 系中的观察者测量 K 系中的光脉冲从 P—J—P 所需要的时间间隔的理想实验

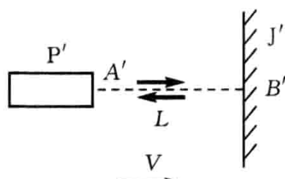


图 1-5 K'系中的观察者测量 K'系中的光脉冲从 P′—J′—P′所需要的时间间隔的理想实验

K 系中的观察者观察到的在 K 系中进行的实验的具体情况如下:一束光脉冲从光脉冲发射—接收器 P 垂直射向平面镜 J 再被 J 反射回 P,光脉冲从光脉冲发射—接收器 P 到平面镜 J 再被 J 反射回 P 的运动路径的行程是 $2L$(如图 1-4 所示),这样在 K 系中的观察者用相对于观察者静止的时钟测得的光脉冲完成从 P 到 J 再被 J 反射回 P 的位置变化所需要的时间间隔 $2\Delta t$ 是:

$$2\Delta t = 2L/C \quad \mathrm{s}(K)$$

$$\Delta t = L/C \quad \mathrm{s}(K)$$

与公式(1.1)相同。相对于 K 系中的观察者,光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P 到平面镜 J 再被 J 反射回 P 的变化过程的整个行程是:

$$2L = 2C\Delta t \quad \mathrm{m}(K)$$

$$L = C\Delta t \quad \mathrm{m}(K)$$

与公式(1.2)相同。

另外,K'系中的观察者观察到的在 K'系中进行的实验的具体情况如下:一束光脉冲从光脉冲发射—接收器 P′垂直射向平面镜 J′再被 J′反射回 P′,光脉冲从光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′再被 J′反射回 P′的运动路径的行程是 $2L$(如图 1-4所示),这样在 K'系中的观察者用相对于观察者静止的时钟测得的光脉冲完

成从 P′到 J′再被 J′反射回 P′的位置变化所需要的时间间隔 $2\Delta t$ 是：

$$2\Delta t = 2L/C \quad s(K')$$

$$\Delta t = L/C \quad s(K')$$

与公式(1.1a)相同。相对于 K'系中的观察者，K 系中的观察者使用所在参照系中的量杆测得的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′再被 J′反射回 P′的变化过程的整个行程的表达式是：

$$2L = 2C\Delta t \quad m(K')$$

$$L = C\Delta t \quad m(K')$$

与公式(1.2a)相同。

另一方面，由于 K 系与 K'系之间存在相对运动，K 系中的观察者观察到在 K'系中进行的实验的具体情况与图 1-5 中发生的情况完全不同，根据运动的合成与分解法则，该观察者观察到的实际情况如图 1-6 所示：一束光脉冲从光脉冲发射—接收器 P′垂直射向平面镜 J′再被 J′反射回 P′。由于 K 系与 K'系之间的相对运动速度为 V，当光脉冲离开光脉冲发射—接收器 P′射向平面镜 J′的过程中平面镜 J′已经不在原先的位置上，而是以速度 V 向前运动了一段路程(如图 1-6 中的②所示)，即光脉冲到达平面镜 J′的行程是 $A'B''$，同时考虑在运动方向上光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′之间的距离 L 相对于 K 系中的观察者的**“长度收缩”**，K 系中的观察者用相对于观察者静止的时钟测得的光脉冲完成从发射—接收器 P′射出到赶上平面镜 J′的整个变化过程所需要的时间间隔为：

$$\Delta t'_1 = L\sqrt{1-V^2/C^2}/(C-V) \quad s(K)$$

而当光脉冲赶上平面镜 J′并被平面镜 J′反射回来时光脉冲发射—接收器 P′同样也不在原先的位置上，而是迎着光脉冲以速度 V 向前运动了一段路程(如图 1-6 中的③所示)，即光脉冲从平面镜 J′又返回发射—接收器 P′的行程是 $B''A'''$，同时考虑在运动方向上光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′之间的距离 L 相对于 K 系中的观察者的**“长度收缩”**，K 系中的观察者用相对于观察者静止的时钟测得的光脉冲完成被平面镜 J′反射回来并重新被 P′接收的变化过程所需要的时间间隔是：

$$\Delta t'_2 = L\sqrt{1-V^2/C^2}/(C+V) \quad s(K)$$

这样，K 系中的观察者用相对于观察者静止的时钟测得的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P′垂直射向平面镜 J′再被 J′反射回 P′的变化过程相对于 K 系所需要的总的时间间隔 $2\Delta t'$($\Delta t'$是 $\Delta t'_1$与 $\Delta t'_2$的平均值)为：

$$2\Delta t' = \Delta t'_1 + \Delta t'_2 \quad s(K)$$

$$= \frac{L\sqrt{1-V^2/C^2}}{(C-V)} + \frac{L\sqrt{1-V^2/C^2}}{(C+V)} \quad s(K)$$

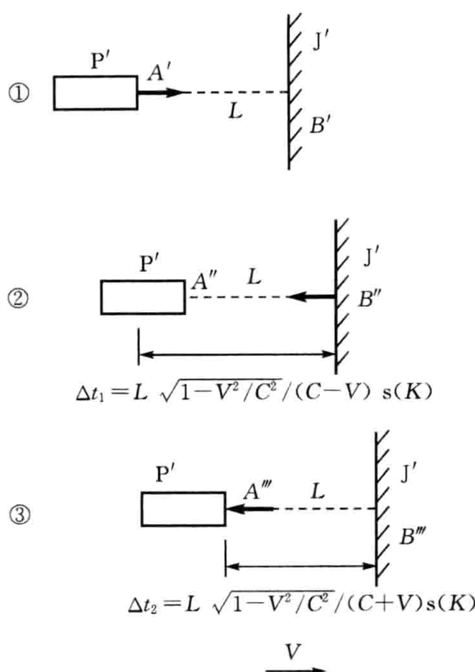


图 1－6 K 系中的观察者测量 K' 系中的光脉冲从 P′—J′—P′所需要的时间间隔的理想实验

$$= \frac{2L/C}{\sqrt{1-V^2/C^2}} \quad \text{s}(K)$$

$$= \frac{2\Delta t}{\sqrt{1-V^2/C^2}} \quad \text{s}(K)$$

即

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-V^2/C^2}} \quad \text{s}(K) \tag{1.3a}$$

显然，公式(1.3a)与公式(1.3)的形式及意义完全相同。

另外，根据光速不变原理，相对于 K 系中的观察者而言，光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P′垂直射向平面镜 J′再被 J′反射回 P′的变化过程的整个行程是 $A'B''A'''$，K 系中的观察者使用所在参照系中的量杆测得的量值为：

$$2L' = C\Delta t'_1 + C\Delta t'_2 \quad \text{m}(K)$$

$$= 2C\Delta t' \quad \text{m}(K)$$

$$= \frac{2C\Delta t}{\sqrt{1-V^2/C^2}} \quad \text{m}(K)$$

$$= \frac{2L}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\,\mathrm{m}(K)$$

即

$$L' = \frac{L}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\,\mathrm{m}(K) \tag{1.4a}$$

显然，公式(1.4a)与公式(1.4)的形式及意义完全相同，而且这里同样有L'大于L，即K系中的观察者用相对于观察者静止的量杆测得的K'系实验装置上产生的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器P′到平面镜J′再被J′反射回P′相对于K系的运动路径的行程$2L'$，较K系中的观察者用相对于观察者静止的量杆测得的K系实验装置上产生的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器P到平面镜J再被J反射回P的运动路径的行程$2L$增大了，或者更确切地说K系中的观察者用相对于观察者静止的量杆测得的在K'系中物质完成某一变化过程所经历的路径，较K系中的观察者用相对于观察者静止的量杆测得的在K系中物质完成同一变化过程所经历的路径增大了。该理想实验同样可以借助洛伦兹变换进行分析，由于方法与上述类似我们就不再作详细论述。

通过对上述两个理想实验的详细分析可见，K系与K'系之间相对运动的结果是对K系中的观察者而言，K'系中实验装置上的光脉冲的整个行程L'的值，相对于L值的增大(即L'产生了相对膨胀)，并且总是与L'的值相对于L值的增大相伴随的是$\Delta t'$的值相对于Δt值的增大，这里的L、L'、Δt、$\Delta t'$总是与光脉冲的空间位置的变化相关的量。由公式(1.3)及(1.3a)可得：

$$\Delta t' : \Delta t = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-V^2/C^2}} : \Delta t = \frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$$

由公式(1.4)及(1.4a)可得

$$L' : L = \frac{L}{\sqrt{1-V^2/C^2}} : L = \frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$$

从而存在关系：

$$\Delta t' : \Delta t = L' : L = \frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$$

即$\Delta t'$相对于Δt增大的倍数与L'相对于L增大的倍数完全相同，而Δt(或$\Delta t'$)是光脉冲完成行程为L(或L')的空间位置的变化所需要的时间间隔(这里的时间间隔Δt(或$\Delta t'$)显然是光脉冲空间位移的时间性的体现)，因此$\Delta t'$相对于Δt的增加总是与L'相对于L的增加相对应并且完全由L'相对于L的增加所决定。在此L'相对于L的增加(行程的相对增加)显然是导致$\Delta t'$相对于Δt按相同的比例增加(完成相应的行程所需时间的相对增加)从而使得公式(1.3)成立的唯一原因，也就是说公式(1.3)只与光脉冲的空间位置的变化量有关。这样，相对于K系中的观

察者而言，K 系中的观察者用相对于观察者静止的时钟测得的 K' 系中的实验装置上产生的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′再被 J′反射回 P′的整个行程为 $2L'$ 的变化所需要的时间间隔 $2\Delta t'$，较 K 系中的观察者用相对于观察者静止的时钟测得的 K 系中的实验装置上产生的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P 到平面镜 J 再被 J 反射回 P 的整个行程为 $2L$ 的变化所需要的时间间隔 $2\Delta t$，按一定比例 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ 增大的原因完全而且仅仅是由于相对于 K 系中的观察者而言 K' 系中的实验装置上产生的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′再被 J′反射回 P′的整个变化的行程 $2L'$，较 K 系中的实验装置上产生的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P 到平面镜 J 再被 J 反射回 P 的整个变化的行程 $2L$，按相同的比例 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ 增大的缘故，而且除此之外再没有其他原因，因此本质上是路径相对膨胀及光速不变原理的体现。显然，根据运动的合成与分解法则，在以上两个理想实验中各参照系实验装置上的光脉冲完成变化过程所经历的路径的相对增大的规律是所有类似的变化过程都具有的，是两个相对运动参照系间的相对性效应，因此必须被看做是空间的相对膨胀引起的，是所在空间的整体效应或性质，因此可以说以上理想实验中路径的相对增大的原因是相对于静系（观察者所在的参照系）中的观察者而言动系（相对于观察者运动的参照系）所在空间发生了相对膨胀。这一结论表面上看似乎与相对论中“长度收缩”的结论相矛盾，但本质上却是完全一致的。一方面，我们上面的相关推理中显然已经考虑了物体在运动方向上的“长度收缩”这一事实；另一方面，这一结论本质上与洛伦兹变换完全一致，如爱因斯坦在其著作中的论述：“洛伦兹变换式体现的不是长度收缩，而是长度膨胀。在式 $x'=\gamma(x-ut)$ 中，x' 是自 s' 系观察时 p 点与坐标原点 o' 的距离。自 s 系观察时这一距离（即 p 点与 o' 的距离）为 $L_0=x-ut$，若自 s' 系观察时 p 点与 o' 的距离为 L，显然有 $L=\gamma L_0$。也就是长度膨胀。同样在式 $x=\gamma(x'+ut')$ 中，x 是自 s 系观察时 p 点与坐标原点 o 的距离。自 s' 系观察时这一距离（即 p 点与 o 的距离）为 $L_0=x'+ut'$，若令自 s 系观察时 p 点与 o 的距离为 L，显然有 $L=\gamma L_0$。由此可知，长度膨胀是相互的①。”可见我们获得的结论与狭义相对论的理论体系是一致的，而且本质上也与广义相对论的弯曲空间（导致空间中任意两点之间的测地线的膨胀）的概念及相应的结论完全一致。

结合上述分析过程并运用物体的位移或运动速度的合成与分解的方法可以证

① [美]阿尔伯特．爱因斯坦．相对论——广义与狭义相对论全集[M]．易洪波，李智谋，译．南京：江苏人民出版社，2011：75－76．

明，在上述理想实验中把光脉冲发射—接收器 P（或 P′）与平面镜 J（或 J′）以如图 1-7①、②所示方式随意放置，使得从光脉冲发射—接收器 P（或 P′）到平面镜 J（或 J′）所做的垂线与运动速度 V 的方向成任意角度 ϕ（$0°<\phi<90°$）的情况，如果对这种情况进行详细分析同样可以获得与上述两个理想实验完全相同的结论。即对 K 系的观察者而言，由于 K' 系中的光脉冲在从 P′ 垂直射向平面镜的方向上的运动可以被分解为与运动速度 V 垂直的方向及与运动速度相同的方向。也就是说可以将光的位移 L 分解为 $L\cos\phi$ 及 $L\sin\phi$，根据光速不变原理，在这两个方向上光完成相应空间位值的变化所需要时间的平均值分别为 $\Delta t'\cos\phi=\dfrac{\Delta t\cos\phi}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ 及 $\Delta t'\sin\phi=\dfrac{\Delta t\sin\phi}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$，从而有 $\Delta t'=\dfrac{\Delta t}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ s(K)，这样就可得到与上面的分析过程完全相同的结论。即在实验装置随意放置的情况下所得到的结论仍然相同，从而该效应在整个惯性参照系中具有各向同性，因此这一结论具有普遍意义。特别的，由于时钟是具有严格周期性的特殊的物质变化过程，因此，如果我们将上述理想实验中的实验装置更换为时钟等计时装置则可以得到基本相同的结论，这一点我们将在下面进行较详细的讨论。我们知道，在任何精密的科学实验中都会使用到（精度极高的）时钟，而在使用时钟对物质的变化过程的时间性进行测量时，除了要考虑时钟所处环境中的振动、电磁、温度、宇宙射线等对时钟的干扰因素之外，对时钟如何放置（如放置的位置及方向）都没有也不可能作任何特殊的要求或规定，而且迄今为止科学家所作的任何科学实验都没有也不可能发现时钟对时间

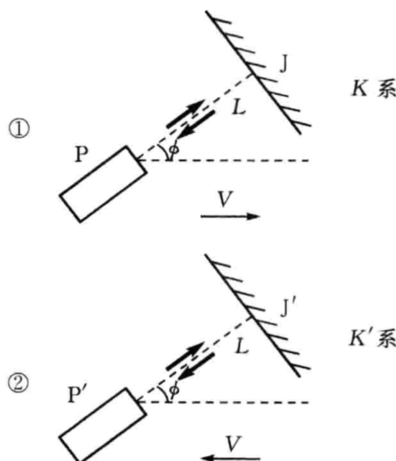


图 1-7　K（K'）系中的观察者测量光脉冲
从 P(P′)—J(J′)—P(P′)所需要的时间间隔的理想实验

的测量与其放置的位置及方向有任何关系，否则我们就可以通过对时钟的不同的放置位置及方向来测量任何一个参照系的绝对运动，而这与狭义相对性原理是相冲突的，因此这一结论对所有科学实验都具有重要意义。显然，上述两个实验同样可以借助洛伦兹变换公式进行分析，在此就不再赘述。上述结论是相对于 K 系中的观察者而言的，其实这一结论具有相对意义，K'系中观察者同样可以得到类似的结论。通过我们对上述理想实验的分析可以得到以下结论：

【结论一】 因为 K 系与 K'系之间的相对运动（相对运动的速度为 V），与在 K 系的实验装置中发生的“光脉冲从光脉冲发射—接收器 P 运动到平面镜 J 再被 J 反射回光脉冲发射—接收器 P”这一变化过程的情况相比，在 K'系的实验装置中光脉冲完成同一变化过程所需经历的路径（或行程），相对于 K 系中的观察者而言按比例 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ 增大（或膨胀）了，由于这种路径的相对膨胀与实验装置放置的位置及方向无关，这也就意味着相对于 K 系中的观察者而言与 K'系关联的三维空间中任何两点之间的距离（相应的三维空间）均按比例 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ 发生了膨胀，并且由于光脉冲的速度相对于任何参照系中的观察者而言都是恒定的，所以在 K'系的实验装置中光脉冲完成同一变化过程所需要（而不是任何其他意义或形式）的时间间隔相对于 K 系中的观察者而言也必定按相同的比例增大。因此光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P 运动到平面镜 J 再被 J 反射回光脉冲发射—接收器 P 整个变化过程所需要的时间具有相对性。在此将 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ 称为因不同参照系之间的相对运动所导致的动系所在空间中任意两点之间距离的相对膨胀系数。另外，相对于 K'系中的观察者我们同样可以得到相似的结论，即该效应具有相对性。

【结论一】是通过对上述实验装置中光脉冲完成其运动过程需要的时间的理想实验的分析所作出的结论，实际上由于【结论一】中涉及的效应是两参照系之间的相对运动引起的，是相对（而非绝对）性效应，因此是一种整体效应从而具有“协变”性，适用于包括光脉冲在内的一切物体的类似的运动过程，这就意味着如果将上述两个关于光脉冲的理想实验中的光脉冲换成钢球或其他弹性物体、光脉冲发射—接收器 P 换成钢球弹射机、平面镜 J 换成弹性板后再进行类似的理想实验则可以得到完全相同的结论，即这些不同的物体所经过的路径都必定按完全相同的规律相对增大，从而物体完成相应路径的变化所需要的时间也按相同的规律相对增大，这就是描述物体运动路径的相对膨胀及物体完成其相应的变化过程所需要的时间的相对增大的公式只与两参照系之间的运动速度有关而与运系中物体及其运动速度无关的原因。具体分析方法与以上所述基本相同（当然需考虑狭义相对论中运

动物体的速度叠加公式)，在此就不作进一步的讨论了。另外，借助相对性原理可以直接将该结论推广至任何物质完成其变化过程的情况，对此将在下面的章节中作进一步的讨论。

再者，还可以把上述两个理想实验中 K 系及 K' 系中的实验装置分别置换为结构完全相同的两只理想的脉冲型光钟，并且假定这种理想光钟由间距为 L 的反射面相互平行放置的两个反射体构成，同时，放置在每一个参照系中的理想光钟的两个反射体之间都有一束光脉冲在两个反射体之间不断被反射体反射而没有丝毫衰减，被反射体反射的光脉冲相对于本参照系中的观察者都严格重复同一条路径，显然这是理想的周期性变化过程，具备标准时钟的所有条件。假定相对于 K 系中的观察者而言，K 系中的光钟上的光脉冲完成一个周期性的变化过程所需要的时间间隔为 T s(K)，K' 系中的光钟上的光脉冲完成一个周期性的变化所需要的时间间隔是 T' s(K)，通过与上述分析过程类似的分析同样可以得到相对于 K 系中的观察者而言 K 系中的光钟上的光脉冲的变化周期 T s(K)及 K' 系中的光钟上的光脉冲的变化周期 T' s(K)之间的关系为：

$$T' = \frac{T}{\sqrt{1 - V^2/C^2}} \quad \text{s}(K) \tag{1.3a$_1$}$$

以及相对于 K 系中的观察者 K 系中的光钟上的光脉冲的变化频率 $\gamma = 1/T$ Hz (K)与 K' 系中的光钟上的光脉冲的变化频率 $\gamma' = 1/T'$ Hz (K)之间的关系为：

$$\gamma' = \gamma \sqrt{1 - V^2/C^2} \ \text{Hz}\,(K) \tag{1.3b}$$

由公式(1.3a$_1$)可知 $T' > T$，即相对于 K 系中的观察者而言，由于 K' 系所在空间中任意两点间的距离相对于 K 系均按比例 $1/\sqrt{1-V^2/C^2}$ 发生了膨胀，因此 K' 系中的光钟上的光脉冲完成其变化过程所经历的路径相对变长，从而 K' 系中的光钟上的光脉冲完成一个周期性的变化过程所需要的时间间隔较 K 系中的光钟上的光脉冲完成一个周期性的变化所需要的时间间隔按相同的比例增大，从而 K' 系中的光钟上的光脉冲在单位时间内完成周期变化的次数——光钟的频率 γ'，较 K 系中的光钟上的光脉冲在单位时间内完成周期变化的次数——光钟的频率 γ 减小，即 $\gamma' < \gamma$，这就是公式(1.3b)的意义，这也就意味着相对于 K 系中的观察者，K' 系中的光钟比 K 系中的光钟走得慢。由于 K 系相对于 K 系中的观察者是静止的参照系，K' 系相对于 K 系中的观察者而言为运动的参照系，所以也可以说动系中的光钟相对于静系中的光钟走得慢。显然，这里所说的光钟的相对变慢就是指光钟所产生光脉冲的每一个周期性变化过程的相对变慢(即光钟的光脉冲完成每一个周期性的变化过程所需要的时间相对变长)而非时间的相对变慢，也就是说我们不能将变化的快、慢等同于时间的快、慢，因为两者显然是完全不同的概念，对此亚里士多德在其著作中已经作过严格的区分："变化总是或快或慢，而时间没有快

慢。因为快慢是用时间确定的:所谓快就是时间短而变化大,所谓慢就是时间长而变化小[①]。"

由上面的讨论可知,正是由于两个参照系之间的相对运动导致了相对于静系中的观察者而言动系所在的空间必然发生相对膨胀,并且任何物质都存在于空间中从而其变化(而物体在空间中发生的位移则是一种特殊的变化)必须在空间中发生,因此空间的相对膨胀必然会对存在于其中的所有物质的存在及其变化过程的时间性产生相对影响(即使得物质完成其确定的变化过程所需要的时间相对增大、过程相对变慢)。而由于相对于静系中的观察者而言动系所在空间的相对膨胀导致了随意放置于其中的光钟(而非时间)按确定的规律相对变慢,并且光钟的变慢是相对(而非绝对)性效应,同时在动系中的观察者看来任何校对好的(包括生物钟在内的)普通时钟(假定这些时钟在惯性系中都能正常工作)与光钟(除了精度之外)都是走时完全一样的钟,因此,根据相对性原理,对静系中的观察者而言由空间的相对膨胀导致的动系中的光钟相对变慢现象必定具有普遍性或协变性,即如果我们把上述实验装置换成机械时钟、电子钟及原子钟甚至结构更加复杂的化学钟或生物钟(其实化学变化甚至生物变化在某种意义上可以还原成力学及电磁学的变化)等计时工具,则由于空间的相对膨胀(从而导致空间中任意两点之间的距离相对增大),这些时钟必定会按与上述光钟完全相同的规律相对变慢,从而结论与光钟的情况完全相同,这就意味着由空间的相对膨胀造成的时钟变慢现象与时钟的结构及放置方式没有任何关系。换句话说,如果将任何一种类型的时钟随意放置在动系中,那么相对于静系中的观察者而言,动系中所放置的这些时钟都会按公式($1.3a_1$)所描述的规律变慢,而其唯一的原因就是动系所在空间的相对膨胀(当然必须在光速不变原理这一前提条件下)。这一结论显然与相对性原理完全一致,因为根据相对性原理,任何力学和电磁学实验都无法区分静止的和匀速运动的惯性参考系,即观察者所作的任何实验都无法证实其所在参照系的绝对运动,所以对静系中的观察者而言,相对于动系静止的任何时钟(假定它们的精度完全相同)的走时都应该完全一致(即完全等价);否则,静系中的观察者就可以利用动系中不同时钟走时的不一致的现象测量出动系的绝对运动,而这显然与狭义相对性原理相矛盾。特别的,当参照系 K 与 K' 之间的相对运动的速度达到光速 C,也就是在公式($1.3a_1$)中当 $V \to C$ 时,$\Delta t'$(或 $2L'$)$\to \infty$,即光钟的光脉冲完成一个周期的变化过程所需要的时间为无穷大,从而在静止的参照系看来,运动参照系中的时钟周期趋近于无穷大或者频率趋近于零,即动系中的任何时钟都几乎停止了摆动,这就是任何一本狭义相对论教材中都会提到的时钟变慢现象(也常被称做钟慢效应)。在

① [古希腊]亚里士多德. 物理学[M]. 张著名,译. 北京:商务印书馆,1982:123.

此需要指出的是，在公式($1.3a_1$)中当$V \to C$时光钟的光脉冲完成一个周期的变化过程所需要的时间之所以为无穷大，主要是光脉冲完成一个周期的变化过程所要经历的路径同样也是无穷大的缘故。由于光钟变慢现象完全是由测量光脉冲(或物体)在空间中的运动过程所需要的时间具有相对性的实验导出的结论，因此该公式只能适用于相应的情况而不应对其作无根据的推论。

因此，**时钟相对变慢现象完全是由于两个参照系之间的相对运动导致的相对于静系中的观察者而言动系所在空间发生的相对膨胀使得其中的时钟钟摆(或振子单元)的每一次周期性摆动(或振动)所需经历的路径相对增大从而钟摆(或振子单元)完成这一相对增大的路径所需要的时间间隔(而非时间间隔本身)也按同一比例相对增加造成的，也就是说由公式($1.3a_1$)描述的时钟相对变慢现象完全是空间相对膨胀的结果或具体表现形式(或反映)，其本质(即根本原因)就是空间的相对膨胀；该现象从物体运动过程所具有的时间性方面反映了空间的相对膨胀，是发生在空间中的物体运动过程的时间性的体现。**可见，正因为由公式($1.3a_1$)描述的时钟相对变慢现象完全是由空间的相对膨胀导致的时钟钟摆摆动路径的相对膨胀(由公式(1.4)或(1.4a)描述)直接推导出来的，所以由公式($1.3a_1$)描述的时钟相对变慢现象可以而且只能从空间(而非时间)的相对膨胀这一唯一原因得到解释。上述讨论所构成的对钟慢效应的诠释是很自然地从相关的理想实验中引申出来的，并且与相对论的理论体系完全一致。我们知道，爱因斯坦在对时钟变慢现象进行分析时同样使用了与上面类似的理想实验，所获得的时钟变慢公式也完全相同，但或许是爱因斯坦感觉对普通时钟的相对变慢现象的相关分析需要涉及时钟复杂的结构，而一旦将时钟看做具有复杂结构的对象，那么就必须建立相应的方程对其进行详尽的描述，这反而会使得问题复杂化。为尽快获得最一般的结论而直接采用了更为简洁的方法，即使用相对性原理将理想实验的结论直接推论至普通时钟的情况，并以此直接引申出时间变慢或膨胀的结论，此后的物理学家基本都沿用了这一思路，而这种做法实际上阻碍了人们对时钟相对变慢现象的进一步思考。显然，我们这里获得的结论与爱因斯坦对时钟变慢现象的诠释是完全不同的，爱因斯坦认为：时钟变慢是同时性的相对性的结果，是时间的属性①。而且还有学者试图借助相应的数理逻辑推理来佐证爱因斯坦的观点，但如果经过仔细分析就可以发现所有这些所谓的推理都是牵强附会的，而且从上面的所有讨论可以发现在时钟变慢公式的推导过程中根本没有并且也不需要使用同时性的相对性概念，确切地说时钟变慢现象与由于两个参照系之间的相对运动导致的空间的相对膨胀、时钟

① [美]阿尔伯特·爱因斯坦.相对论——广义与狭义相对论全集[M].易洪波，李智谋，译.南京：江苏人民出版社，2011:35.

钟摆所经历的路径因此发生相对膨胀密切相关,而与同时性的相对性之间根本没有直接的关系,即使是爱因斯坦在其著名的《论动体的电动力学》的论文中以及任何其他相关的论著中对时钟变慢公式的推导,也不是根据同时性的相对性作出的。

显然,时钟变慢公式并非而且也不可能从两事件的同时性具有相对性这一论据推导出来:如果两事件在 K 系中是同时发生的,即令某一参照系 K 中描述两事件的洛伦兹(时间)变换式中的时刻值 t_1 及 t_2 相等,即 $t_1=t_2$,则显然与之相对应的 t_1' 及 t_2' 不相等,即在与 K 系之间的相对运动速度为 V 的 K' 系中的观察者看来这两事件并非同时发生的,从而同时性具有相对性。显然,两事件的同时性是这两个事件发生的先后次序关系,同时性的相对性的具体情况与该两事件所在的空间坐标以及相关的两参照系之间的相对运动的速度都有关系。正因为两事件发生的同时性具有相对性,所以相对于其中一个参照系中的观察者而言,放置在另一个参照系中不同空间位置上的每一个时钟虽然快慢完全一样但零点不同,因此需要将这些零点不同的时钟进行校对。而如果令参照系 K 中的光钟上的光脉冲在产生出来以及受到反射这两个事件在 K 系中建立的坐标系 (x,y,z,t) 的 x 轴上的坐标相等,即 $x_1=x_2$,则 K 系中发生的两个事件在与 K 系相对运动的速度为 V 的 K' 系中的坐标系 (x',y',z',t')(这里 $Ox /\!/ O'x'$,$Oy /\!/ O'y'$,$Oz /\!/ O'z'$,并且 x 轴与两参照系相对运动的速度平行)中的坐标与两个事件在 K 系中的坐标系上的坐标之间存在洛伦兹变换关系,这样,借助洛伦兹变换关系就可以得到时钟变慢公式,即在 K 系中的观察者看来 K' 系中的时钟钟摆的摆动频率变小了,从而在 K 系中的观察者看来 K' 系中的时钟变慢了,这就是时钟相对变慢现象。显然,K' 系中的每一只时钟相对于 K 系中的观察者而言都按相同的比例变慢了,时钟变慢现象只与两参照系之间的相对运动的速度有关,而与两个参照系中时钟的具体空间坐标没有任何关系。由于两个相对运动的参照系中的时钟摆动的频率是不同的,因此在对这样的两个参照系中的时钟进行校对时还需要考虑时钟变慢效应。也就是说,同时性的相对性及时钟相对变慢这两种现象都可以凭借洛伦兹变换推导出来,但由于同时性的相对性是两个相对运动的参照系中的观察者,对其中一个参照系中所发生的不同空间位置上两个事件发生顺序的观察结果之间的关系,而时钟变慢公式反映的则是放置在不同参照系中的时钟的周期或频率之间的关系,可见,这两种现象是分别从完全不同的条件下导出的,因此两者是完全不同的现象,从而时钟变慢现象完全不是同时性的相对性的结果。在此需要特别指出的是,虽然实际比较两个不同参照系中时钟之间的快慢时需要进行同时性的操作,如赵展岳先生在其著作中所说的:“要比较两个相距甚远的钟 A 和钟 B 的固有时进程,就必须有一个通过直接比较建立起来的共同标准,这就是同时性标准,它是通过相邻的钟逐个直接比较而建立起来的。有了同时性标准才能比较钟的快慢。首先确定 A 钟的(固

有时)τ_A时刻与B钟的τ_B时刻同时;以后再确定τ'_A与τ'_B时刻同时,然后比较处于这两个"同时"之间的各自的固有时间隔$\tau'_A-\tau_A$和$\tau'_B-\tau_B$何者为大。这样就能表明何者为快,何者为慢[①]。"但是这里所说的对时钟的同时性操作显然仅仅是用于比较时钟快慢的方法的一部分而不是导致时钟快慢的原因,因为两个时钟的快慢并不是通过在对它们的比较过程中产生的。由于洛伦兹变换是从光速不变原理这一前提推论出来的,因此时钟的相对变慢现象与同时性的相对性这两种现象又都是光速不变原理的结果。另外,在下面的进一步讨论中我们将看到正是由于爱因斯坦在其相对论中将时钟相对变慢现象与同时性的相对性概念甚至时间概念直接关联起来从而才最终导致了时间观念的混乱。

显然,公式(1.3a$_1$)涉及的时钟的变化周期$T(T')$或变化频率$\gamma(\gamma')$是物质性的周期性变化(如物质的周期性振动、振荡或旋转)的变化周期或变化频率,这种周期性变化必然伴随着能量、动量乃至与环境间所发生的物质交换的周期性变化或周期性转化。如上面的理想实验中涉及的光钟的光脉冲在两个平行放置的反射体之间被来回反射的过程中光子的动量发生的周期性变化、时钟的钟摆在周期性摆动过程中发生的钟摆的动能及势能之间周期性的相互转化、分子在周期性振荡过程中发生的分子的动能及势能之间的周期性相互转化、物体在无引力场作用的空间环境作匀速圆周运动过程中所发生的动量的周期性变化、匀相化学振荡过程中出现的系统与外界之间周期性的能量以及物质的交换等等,正因为在这些变化过程中存在能够被仪器检测的到从而能够对其进行计数的能量或动量的周期性转化,才使得这些变化过程可以作为时钟使用。所谓的匀相化学振荡是指某些耗散系统在一种颜色与另一种颜色之间不间断地循环变化的过程,这种现象与存在于所有动植物体内、支配着动植物生理变化过程的生物钟类似。显然在匀相化学振荡过程中存在物质及能量的周期性变化或转化,正是由于这种振荡是系统在发生振荡过程中不断产生热量的化学耗散过程,从而在系统变化过程中存在与外界所发生的物质及能量的交换。但是并非所有的周期性现象都是物质性,并伴随着能量或动量的周期性变化或周期性转化,下面我们来看一个非常重要的有关量子力学中周期性变化的实例。

根据德布罗意的物质波假说,每一个微观粒子永远都有一列物质波与之相伴随,而物质波显然是一种周期性变化的现象,确切地说在每一个空间坐标点上物质波的相位都会发生周期性的变化。如果粒子的能量为恒定值E、动量为恒定值p,则与之相伴随的物质波是一单色平面波,特别的物质波的频率γ与其粒子的能量E之间的关系为:$E=h\gamma$,物质波的波长λ与其粒子的动量p之间的关系是:$p=h/$

① 赵展岳.相对论导引[M].北京:清华大学出版社,2002:123.

λ；根据狭义相对论的质一能公式 $E=mC^2$，则有 $E=mC^2=h\gamma$；由动量 $p=mV$，有 $p=mV=h/\lambda$。对于相对于 K'系静止的粒子，假设该粒子的静止质量为 m_0，则相对于 K'系中的观察者有如下关系：

$$E_0=m_0C^2=h\gamma_0$$

如果该粒子相对于 K 系以速度 V 运动，则该粒子相对于 K 系中的观察者的质量为 $m=\dfrac{m_0}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$，这样，相对于 K 系中的观察者有如下质能关系：

$$E=\frac{m_0C^2}{\sqrt{1-V^2/C^2}}=h\gamma$$

根据上面与 K'系相对静止的以及与 K 系相对运动的粒子的能量 E 与其物质波的频率 γ 之间的关系显然可以得到如下公式：

$$\gamma=\frac{\gamma_0}{\sqrt{1-V^2/C^2}} \tag{1.3b$_1$}$$

比较该公式与公式(1.3b)的数学表达式，二者之间似乎存在较明显的矛盾。公式(1.3b_1)表明微观粒子与 K 系之间相对运动的速度 V 越大，则粒子的能量 E 就越大从而其物质波的频率 γ 也越大，简单地说就是"相对运动的速度越大则频率越大"；而公式(1.3b)则表明，K 系与 K'系之间的相对运动的速度 V 越大，则 K'中的时钟的钟摆相对于 K 系中的观察者的摆动频率 γ 越小，简单地说就是"相对运动的速度越大则频率越小"。有人可能因此会下结论说"假定有一只与物质波的波动频率完全同步的运动时钟，那么相对于静系中的观察者而言，随着相对运动速度的增加，运动时钟的频率也会增加，因此运动时钟是变快了而非如狭义相对论中所说是变慢了，从而狭义相对论中关于运动时钟的有关结论是错误的或者至少是有问题的"。

其实，这样的结论仅仅是从有关公式的数学意义上所作的简单推论，完全没有对相关公式的物理意义进行深入的分析、思考，如果稍作分析我们就会发现，这里并不存在矛盾。首先，对物质波而言，所谓的相速度 $w=\gamma\lambda=E/p=C^2/V$ 是物质波的相位变化的速度；当粒子与 K 系之间的相对运动的速度 $V\to 0$ 时，与粒子相伴随的物质波的相速度 $w\to\infty$，物质波的相位变化的频率 $\gamma=\gamma_0$；而当 $V=C$ 时，与粒子相伴随的物质波的相速度 $w=C$，物质波的相位变化的频率 $\gamma\to\infty$，可见，一般情况下微观粒子的物质波的相位在空间中变化的速度显然大于光速。从而物质波的相位的变化过程不可能遵循洛伦兹变换规律，即我们不可能对物质波的相位的变化过程进行洛伦兹变换(实际上这种变换关系根本就不存在)，这也就意味着物质波的相位变化的频率 γ 可以完全不遵循狭义相对论的时钟钟摆的摆动频率变慢的公式(1.3b)所描述的规律。正如物质波的相速度可以超过光速从而与相对论的

光速不变原理并不矛盾一样，物质波的相位变化的频率 γ 不遵循狭义相对论的时钟钟摆的摆动频率变慢的规律这一点与狭义相对论之间同样不存在任何矛盾，因为两者是性质完全不同的周期性现象。另外，所有关于微观粒子波动性的物理实验都证明所谓的物质波，实际上并非真实的物质性波场而是一种(虚拟的)几率波。因此物质波的相位变化的频率 γ，并非某种物质的周期性振动(如微观粒子本身的周期性振动等)的频率；再者，由于我们上面假定了微观粒子的能量 E 及动量 p 都是恒定的，因此粒子的能量及动量本身不可能发生周期性变化，特别是从公式 $E=h\gamma$ 及 $p=h/\lambda$ 可知物质波的频率及波长显然是隐含在粒子的能量及动量“之内”，而不是与粒子的能量及动量对应的某种实在对象的变化频率及波长，从而这里并不存在与物质波的相位变化频率及波长相对应的能量或动量的周期性变化或周期性转化。即这里不存在与物质波的频率 f 相对应的物质性的周期性变化过程的变化周期 $T=1/f=T_0\sqrt{1-V^2/C^2}$，或者说由公式 $T=1/f$ 计算出的所谓变化周期 T 没有真实的物理意义，这一点完全不同于普通的机械波的情况。因此，物质波虽然是一种周期性现象，但是这种周期性现象并不能直接向我们呈现出来，从而我们也不可能对空间中的任何物质波相位的周期性变化进行直接或间接的测量及计数，更不可能直接利用这种周期性现象制作任何可以使用的时钟。这种情况与普通的机械波完全不同，对普通的机械波而言，在机械波经过的某一空间坐标上我们可以对该坐标上的机械波的相位的变化进行测量，并可对该点上的周期性的相位变化进行计数，之所以如此，关键在于机械波的相位变化涉及能量及动量的变化。反之，假如物质波的周期性过程可以被直接利用来制作时钟，那么这种时钟的计时必定与日常的及科学实验中所使用的时钟的计时相矛盾，特别是与狭义相对论的理论体系相矛盾，那么我们的所有计时体系也将不复存在。

1.2.2 不同惯性系中的观察者对发生在同一惯性系中的某一确定的物质变化过程的完成需要的时间间隔的测量值(而非该时间间隔本身)具有相对性

我们知道，在物理学中对任何一个物理量进行测量所得到的具体测量值与所使用的相应的测量单位是密不可分的，而且对同一物理量进行测量时所采用的不同的测量单位与相应的测量值之间存在一定的关系。由于不同惯性系中的观察者对同一惯性系中的某一时间间隔或线段的长度进行测量所得到的测量值之间的关系涉及所使用的测量工具的测量单位，从而不同惯性系中的观察者使用的测量工具的测量单位之间必定存在某种关系。在之前的讨论中反复提到了 K 系与 K' 系中的观察者使用时钟及量杆等测量工具对时间及长度进行测量，而对于任何物理量的测量所使用的测量工具都有确定的测量单位，那么上面的讨论中 K 系与 K' 系中的观察者使用的时钟及量杆的测量单位之间存在什么关系呢？实际上通过对

K 系与 K' 系中的观察者使用的时钟（或量杆）对某一时间间隔（或某一线段的长度）进行测量所获得的测量值之间的关系，进行简单的分析就能够确定相应的测量单位之间的关系。

在讨论前，先就测量方面的知识进行简单的回顾。我们知道，对物质对象的某一物理性质的测量就是用与该种物理性质相关的确定的测量单位，对该物质对象的某一物理性质进行测量并获得测量值从而对该物理性质进行赋值的过程，并且存在如下关系：**某物理量的测量值×测量单位＝该物理量的值**。例如对某一线段的长度进行测量，就是用确定的长度单位对该线段的长度进行测量从而对该线段进行赋值的过程，原则上长度单位可以随意选取而不会对测量结果产生任何影响，如分别选取长度单位Ⅰ及长度单位Ⅱ对该线段进行测量，如果获得的测量值分别是测量值Ⅰ及测量值Ⅱ，则根据线段的测量值与测量单位之间的关系可得：**线段测量值Ⅰ×长度单位Ⅰ＝线段测量值Ⅱ×长度单位Ⅱ**，即线段的测量值与相应的长度单位成反比，从而选用的测量单位越大则得到的测量值越小，这一关系适用于任何物理量的情况。例如选用 km 做长度单位对该线段进行测量，如果测得的数值（即**测量值**）为 5，则该线段的长度是 5 km；由于存在换算关系 1 km＝1000 m，因此如果用 1 m 做长度单位对该线段进行测量，该线段的**测量值**肯定为 5000，从而该线段的长度是 5000m，由于长度单位 km 较长度单位 m 大，因此用 km 做测量单位得到的测量值 5 较用 m 做测量单位得到的测量值 5000 小，但由于是对同一线段的测量，因此有 5km＝5000m。这也就意味着通过使用不同的长度单位对同一线段的长度进行测量得到的测量值必定是不同的，但绝对不可能导致其真实的长度发生改变；即对同一条线段的长度进行几次正确测量，如果得到的**测量值**是完全不同的，其原因仅仅因为使用了不同的长度单位。又如使用不同的长度单位（m、cm、mm 等）对我们的身高进行测量，结果并不能改变我们的“身高本身”而只是导致所获得的身高的**测量值**发生了改变。再比如用确定的计时单位对一天这一时间间隔进行测量，当选用“小时”做计时单位对其进行测量得到的**测量值**是 24，则一天的时间间隔就是 24 小时；而当选用“分钟”做计时单位时对其进行测量得到的**测量值**是 1440，这样一天的时间间隔就是 1440 分钟；而当选用“秒”做计时单位时对其进行测量得到的**测量值**是 86400，这样，一天这一时间间隔就是 86400 秒。但并不意味这几个不同的数值表示完全不同的时间段，而是意味对同样的一天的时间间隔，采用不同的计时单位进行测量会得到不同的测量值，但一天的时间间隔是不会因为对其进行测量而发生任何改变的，即 24 小时＝1440 分钟＝86400 秒。也就是说对任何物理量的测量都无法改变所测物理量本身，至少对宏观物理量的测量而言的确如此。基于以上关于测量方面的基本知识，进行下面的讨论。

由于包括周期性变化过程在内的任何物质的变化过程都具有时间性，而周期

性变化过程具有可再现性及可计数性的特点，因此可以利用周期性的物质变化过程实现对时间的精确测量。这也就意味着我们通常借以实现对时间进行计量（包括地球的自转在内）的周期性变化过程并非时间本身而仅仅是测量时间的手段或计时单位。对此，现象学特别是海德格尔在其《存在与时间》中进行了详细说明，按海德格尔的观点："日并不是时间本身，而是时间的尺度，即只是时间性借以非本真地到时或非本真地解释自己的尺度[①]。"另外，"日"这一时间尺度完全是由于地球的自转造成的白昼与黑夜的周期性交替而形成的，而从变化的形式上看地球的周期性自转与所有其他周期性的变化（如时钟钟摆的摆动）都是相同类型的物质的变化过程，因此，任何周期性的变化过程都不是时间本身而是时间的尺度，从而都可以作为测量时间的手段（或工具）实现对时间的测量。而**时钟就是这样一类根据特定的物理原理制作的、以由之产生出的一个个具有时间性并且理论上可以精确重复或再现的周期性变化过程作为测量时间的基本单位（也可称做计时单位，常见的计时单位有秒、分、时等）对时间或时间间隔所经历或对应的周期个数进行计数并据此对其进行赋值从而实现对时间或任一时间间隔进行间接测量的工具**。与所有测量工具一样，由于并不存在绝对严格的周期性变化过程，因此时钟对时间的测量也会产生误差。不论是机械钟、电子表还是原子钟，当我们使用这些计时工具对时间进行测量时，本质上就是用时钟的周期性变化不断发生的过程对时间或时间间隔进行测量及赋值，也就是说时钟可以呈现给我们的首先是一系列周期性的变化过程（如时钟的指针在钟面上发生的角位移本身就是一种变化）而不直接就是时间，而正是由于一切物质的变化过程都具有时间性才使得时钟能够成为测量而不是显示时间的工具，换句话说我们不可能对时间进行直接的测量。如果把上述理想实验中 K 系中的时钟的钟摆或振子完成一次摆动或一个周期性振荡所需要的时间（即时钟的一个最小周期）定义为 1 Ut(K)，即 K 系中的一个计时单位，把相对于 K 系中的观察者而言 K' 系中时钟的一个最小周期定义为 1 Ut(K')，即 K' 系中的一个计时单位。根据时钟相对变慢公式（1.3a$_1$）可得：

$$1\ \mathrm{Ut}(K') = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/C^2}}\ \mathrm{Ut}(K) \tag{1.3c}$$

这样，K 系中的时钟的计时单位 1 秒与 K' 系中时钟的计时单位 1 秒之间的换算关系为：

$$1\ \mathrm{s}(K') = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/C^2}}\ \mathrm{s}(K) \tag{1.3d}$$

$$1\ \mathrm{s}(K) = \sqrt{1 - V^2/C^2}\ \mathrm{s}(K') \tag{1.3d$_1$}$$

---

① 黄裕生.时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M].南京:江苏人民出版社,2012:96.

显然，相对于 K 系中的观察者 K' 系中的时钟的计时单位与 K 系中的时钟的计时单位之比是 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$，即对 K' 系中的观察者而言是 1 秒的计时单位相对于 K 系中的观察者而言其计时单位已成为 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ s(K)，也就是说相对于 K 系中的观察者而言 K' 系中的时钟的计时单位与 K 系中的时钟的计时单位相比已经不是 1 秒，而是比 1 秒大(从而包含更多的时间)，即如果 K 系与 K' 系两个参照系中的观察者都将 1 秒定义为铯-133 原子在基态的两个超精细能级结构之间的零磁场跃迁时，对应于辐射频率的 9192631770 个周期所持续的时间，那么显然在 K' 系中铯-133 原子在基态的两个超精细能级结构之间的零磁场跃迁对应于辐射频率的 9192631770 个周期所需要的时间，比 K 系中铯-133 原子在基态的两个超精细能级结构之间的零磁场跃迁对应于辐射频率的 9192631770 个周期所需要的时间长。也就是说相对于 K 系中的观察者而言 K' 系中时钟的计时单位已经发生了改变(也可称做膨胀)、成为与 K 系中的时钟不同的计时单位，即在实际对任何变化过程的时间间隔的测量中与 K 系中的时钟的计时单位相比，K' 系中的时钟的一个计时单位中包含了更长的时间间隔，可见，不同参照系中的时钟的计时单位具有相对性，这一关系对 K 系及 K' 系而言具有普适性。显然，公式(1.3d)及(1.3d_1)是相对于静系中的观察者而言两个参照系中时钟的基本计时单位(秒)之间的换算关系。由此可见，使用计时单位不同(指针摆动频率不同从而快慢不同)的时钟测量同一时间段所获得的时间测量值(也可称做钟表时间)是不同的，走时快从而计时单位小的时钟测得的时间测量值显然要大，而走时慢从而计时单位大的时钟测得的时间测量值显然要小，这就是所谓的时间测量值的相对性而非时间本身(这里所说的时间本身与现象学中所说的本己时间具有完全相同的本体论意义，对此我们将在下面的章节进行讨论)的相对性。这一结论同样具有相对性，即相对于 K' 系中的观察者而言也有同样的结论，确切地说 K 系中的时钟的计时单位与 K' 系中的时钟的计时单位相比已经不是 1 秒，而是比 1 秒大，即计时单位已经发生了改变，成为不同的计时单位。显然，如同“时”、“分”、“秒”等关于时间的计时单位可以按确定的比例进行相互换算一样，K 系与 K' 系的计时单位之间也可以按确定的比例进行相互换算。

同样的，如果我们把 K 系中量杆的长度度量单位定义为 1 m(K)，即 K 系中的 1 米长度，而把相对于 K 系中的观察者而言 K' 系中量杆的长度度量单位定义为 1 m(K')，即 K' 中的 1 米长度，根据公式(1.4)或(1.4a)可得 K 系中量杆的长度单位 1 米与 K' 系中量杆的长度单位 1 米之间的换算关系为：

$$1\ \mathrm{m}(K') = \frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\ \mathrm{m}(K) \tag{1.4c}$$

$$1\ \mathrm{m}(K) = \sqrt{1-V^2/C^2}\ \mathrm{m}(K') \tag{1.4c_1}$$

从而相对于 K 系中的观察者而言 K' 系中量杆的长度度量单位与 K 系中量杆的长度度量单位之比是 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$，即 K' 系中的观察者认为 1 米的量杆相对于 K 系中的观察者而言其长度为 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\ \mathrm{m}(K)$。显然，相对于 K 系中的观察者而言 K' 系中的量杆的长度单位与 K 系中的量杆的长度单位相比已经不是 1 米，而是比 1 米长，亦即长度单位也已经发生了改变（即膨胀），也就是说在实际对空间的测量中与 K 系中的量杆的长度单位相比 K' 系中的量杆的一个长度单位具有更大的长度，即不同参照系中量杆的长度单位具有相对性。显然，公式（1.4c）及（$1.4c_1$）是相对于静系中的观察者而言两个参照系中量杆的基本长度单位（米）之间的换算关系。依据相对性原理，相对于 K 系中的观察者而言 K' 系中的所有物体（包括观察者以及观察者所使用的仪器甚至该参照系中的所有物质单元等）的空间尺寸（如长、宽、高、直径、间距等）也都以相同的比例 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ 增大了；同样的，这一结论也具有相对性，即相对于 K' 系中的观察者而言 K 系中的量杆的长度单位与 K' 系中的量杆的长度单位相比已经不是 1 米，而是比 1 米长，亦即长度单位也已经发生了改变。这就是说相对于 K（或 K'）系中时钟的计时单位及量杆的长度单位，K'（或 K）系中时钟的计时单位及量杆的长度单位全部都以相同的比例 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ 增大了。结合以上讨论我们可以获得结论：**在惯性系中，量杆的长度单位的相对膨胀完全是由三维空间的相对膨胀直接导致的，而时钟的计时单位的相对膨胀（即时钟变慢）则仅仅是由时钟钟摆（或振子）摆动（或振动）路径的相对增大，而不是由时间的相对膨胀直接导致的（关于时间具有相对性的观点是对物质完成其变化过程所需要的时间具有相对性的结论的错误理解，这一点在后面将进行详细的分析），时钟钟摆（或振子）摆动（或振动）路径的相对增大又是由三维空间的相对膨胀造成的，因此时钟的计时单位的相对膨胀是由三维空间的相对膨胀间接导致的。也就是说在惯性系中三维空间的相对膨胀直接导致了量杆的长度单位的相对膨胀并且间接导致了时钟的计时单位的相对膨胀，从而惯性系中的三维空间的相对膨胀同时导致了量杆的长度单位及时钟的计时单位的相对膨胀，因此三维空间的相对膨胀是量杆的长度单位以及时钟的计时单位的相对膨胀的唯一原因。**而由于相对运动导致的量杆的长度单位以及时钟的计时单位的相对膨胀，使得每一个惯性参照系中的观察者对光速进行测量时都不会导致光速的改变，因此光速不变原理实际上也可以由空间的相对膨胀效应来解释，也就是说空间的相对膨胀完全可以作为

一条原理提出。这一点借助【结论一】可以得到很好的解释。

上述关于一个参照系中的时钟的计时单位及量杆的长度单位相对于另一个参照系发生膨胀的结论与洛伦兹变换完全一致，对此我们需要作简单的讨论。关于时间的洛伦兹变换的推导涉及时标（即时间参照坐标系）的定义，以下是爱因斯坦在其狭义相对论及广义相对论中采用的时标的相关描述："用选定的某一瞬间作为原点，用选定的时间单位（实际上应称做计时单位）'秒'进行连续不断的积累，就构成一个时间参照坐标系，叫做时标或时间尺度。时标的原点称做时刻起点或起始历元。某一事件发生的瞬间与时标上某点相对应，此瞬间称做'时刻'。两个时刻之间的持续时间称做'时间间隔'①。"而关于空间及时间的洛伦兹变换就是相对运动速度为 V 并且在初始时刻参照系中的直角坐标系的坐标原点相互重合的两个不同参照系 K 及 K' 中的空间、时间坐标（时标）(x,t) 与 (x',t') 之间的变换关系，即有：

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - V^2/C^2}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - Vx/C^2}{\sqrt{1 - V^2/C^2}}$$

由于空间—时间坐标系定义了空间、时间的原点及度量单位，因此 K 系中的观察者要将其所使用的 K 系中的量杆及时钟所测得的空间—时间坐标 (x,t) 变换为 K' 系中的空间—时间坐标 (x',t')，就必须使用相对于 K 系的 K' 系中的长度及计时单位。我们知道，两参照系 K 与 K' 之间的空间及时间坐标的伽利略变换关系为 $x'=x-Vt$。而在狭义相对论看来，相对于 K 系中的观察者而言，对 K' 系中的某一线段，K' 系中的观察者使用 K' 系中的 1 m 做长度单位进行测量得到的测量值，与 K 系中的观察者使用 K 系中的 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ m 做长度单位进行测量得到的测量值是相等的，即有关系：

$$1\ \text{m}(K') = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/C^2}}\ \text{m}(K)$$

将该等式的两边与伽利略变换关系式的两边分别相乘即可得到关系式：

$$x'\ \text{m}(K') = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - V^2/C^2}}\ \text{m}(K)$$

---

① [美]阿尔伯特·爱因斯坦. 相对论——广义与狭义相对论全集[M]. 易洪波，李智谋，译. 南京：江苏人民出版社，2011:56.

将等式两边的度量单位省略后该关系式也可以表达为：

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - V^2/C^2}}$$

此即关于 K 系与 K' 系之间空间坐标的洛伦兹变换；根据光速不变原理，将等式 $x' = \frac{x-Vt}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ 两边同除以光速 C，同时将 $t=x/C$ 及 $t'=x'/C$ 带入则可以得到关系：

$$t' = \frac{t - Vx/C^2}{\sqrt{1 - V^2/C^2}}$$

该等式也可以表达为：

$$t'\mathrm{s}(K') = \frac{t - Vx/C^2}{\sqrt{1 - V^2/C^2}}\ \mathrm{s}\ (K)$$

该关系式完全等同于 K 系及 K' 系中的观察者各自使用所在参照系中的时间单位对 K' 系中的时间进行测量的结果，此即关于 K 系与 K' 系之间时标的洛伦兹变换。由于有相对运动的不同参照系中的时钟的计时单位之间存在特定的换算关系，因此，时间的洛伦兹变换实际上是，两个相对运动的不同参照系中的观察者使用各自所在参照系中的时钟的计时单位**对同一时间**进行测量所得到的不同的**测量值**之间的关系，是两个参照系中的时钟的计时单位之间关系的具体反映，即不同参照系之间的关于时间的洛伦兹变换实际上是公式(1.3d)或(1.3d_1)的具体表达。从而洛伦兹变换中的 t 及 t' 并非不同的时间，而是不同参照系中的观察者使用所在参照系中的时钟的计时单位对同一时间进行测量获得的测量值的不同表达方式。由此可见，洛伦兹(时间)变换关系其实就是不同参照系中的观察者采用所在参照系中的时钟对同一时间进行测量所得到的时间的测量值之间的变换关系，反映了两个参照系中不同空间坐标上的时钟指针的角位移之间的关系，完全不是时间的相对性的反映。这样，洛伦兹变换本身就包含了一个参照系中使用的计时单位(以及所有物质完成其变化过程所需要的时间)及长度单位(以及空间中任何两点之间的距离)相对于另一个参照系的计时单位(以及所有物质完成其变化过程需要的时间)及长度单位(以及空间中任何两点之间的距离)按相同的比例 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ 增大或膨胀这一前提，从而完全可以看做是空间的相对膨胀及光速不变原理的结果，这一点与爱因斯坦在狭义相对论中的观点是基本一致的，而且也与广义相对论中由于空间中物体质量的存在导致的空间的相对弯曲使得物体(包括时钟的钟摆)在空间中运动路径膨胀的结论完全一致："相对论认为钟慢效应与尺缩效应对应，而我发现时间膨胀必对应长度膨胀……借助 $x=Ct$ 和 $x'=Ct'$，我们看到洛伦兹变换式本

身已经包含了长度膨胀和时间膨胀，不用另行推导。长度膨胀和时间膨胀就是洛伦兹变换的物理本质[①]。"但是这里，爱因斯坦关于"时间膨胀"的观点是值得商榷的，对此将在下面进行重点讨论。从而不同参照系中的观察者用所在参照系中的计时单位及长度单位进行时间及长度测量所获得的时间坐标及空间坐标之间存在的关系就体现了洛伦兹变换的本质——能够使得物理方程具有变换的不变性，这一点正是狭义相对性原理的具体体现。上述结论是相对于 K 系中的观察者而得到的，同样的，根据相对性原理 K' 系中的观察者也可以得到类似的结论。

现在我们再回到上面的【理想实验 1】及【理想实验 2】中来看，在 K 系中的观察者看 K' 系中的观察者使用 K' 系中的时钟测量 K' 系中的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′再被 J′反射回 P′的位置变化所需要的时间间隔 $\Delta t'$。K 系中的观察者使用 K 系中的时钟测量 K' 系中的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′再被 J′反射回 P′的位置变化所需要的时间间隔是：

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\ \mathrm{s}(K)$$

由于在 K 系中的观察者看来，光脉冲从光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′再被 J′反射回 P′的位置变化所经历路径是图 1-3 中的折线 A‴B″C′(或图 1-6 中的折线 A′B″C‴)。那么在 K 系中的观察者看来，K' 系中的观察者使用 K' 系中的时钟测量 K' 系中的光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′再被 J′反射回 P′的位置变化所需要的时间间隔，就是 K' 系中的观察者使用 K' 系中的时钟测量 K' 系中的光脉冲经历如图 1-3 中的折线 $A'''B''C'$(或图 1-6 中的折线 $A'B''C'''$)的路径所需要的时间间隔 $\Delta t'$，由于这段时间间隔对 K 系中的观察者而言也是 $\Delta t'$，从而有：

$$\begin{aligned}\Delta t'\mathrm{s}(K) &= \frac{\Delta t}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\ \mathrm{s}(K)\\ &= \frac{\Delta t}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\cdot\sqrt{1-V^2/C^2}\ \mathrm{s}(K')\\ &= \Delta t\ \mathrm{s}(K')\end{aligned}$$

即

$$\Delta t'\mathrm{s}(K) = \Delta t\ \mathrm{s}(K') \tag{1.3e}$$

$$\Delta t\ \mathrm{s}(K') = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\ \mathrm{s}(K) \tag{1.3f}$$

$$\Delta t\ \mathrm{s}(K) = \sqrt{1-V^2/C^2}\ \Delta t\ \mathrm{s}(K') \tag{1.3g}$$

而不同参照系中的观察者对于光脉冲的行程的测量值之间显然也存在类似的关

① [美]阿尔伯特·爱因斯坦. 相对论——广义与狭义相对论全集[M]. 易洪波，李智谋，译. 南京：江苏人民出版社，2011:76—77.

系，在此不再赘述。也就是说**不同惯性系中的观察者对发生在同一惯性系中的物质变化过程所需要的时间间隔进行测量所得到的测量值而非该时间间隔本身具有相对性**。分别将公式(1.3d)及(1.3d_1)两边乘以 Δt 即可得到公式(1.3e)及(1.3f)，即公式(1.3e)及(1.3f)实际上反映了 K 系与 K'系中计时单位之间的关系，并且同样可以由时间的洛伦兹变换关系导出。公式(1.3f)的意义是对以速度 V 相对运动的两个参照系 K 及 K'，对 K 系中的观察者而言，如果 K'系中的观察者用 K'系中的时钟的计时单位对某一时间段进行测量得到的测量值为 $\Delta t\ \mathrm{s}(K')$，那么 K 系中的观察者用 K 系中的时钟的计时单位对该同一时间段进行测量所得到的测量值则为$\dfrac{\Delta t}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\ \mathrm{s}(K)$；而公式(1.3g)的意义是对以速度 V 相对运动的两个参照系 K 及 K'，对 K 系中的观察者而言，如果 K 系中的观察者用 K 系中的时钟的计时单位对某一时间段进行测量得到的测量值为 $\Delta t\ \mathrm{s}(K)$，那么 K'系中的观察者用 K'系中的时钟的计时单位对该同一时间段进行测量所得到的测量值则为 $\sqrt{1-V^2/C^2}\ \Delta t\ \mathrm{s}(K')$，即对 K 系中的观察者而言 K'系中时钟的测量值始终是 K 系中时钟的测量值的$\sqrt{1-V^2/C^2}$倍。相对于 K 系中的观察者，两个分别放置在 K 系及 K'系中结构完全相同的时钟的钟摆摆动周期之间存在以下关系：

$$T\ \mathrm{s}(K') = \frac{T}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\ \mathrm{s}(K) \tag{1.3h}$$

其意义是分别放置在两个参照系中的结构完全相同的时钟(如果这两个时钟放置在同一个参照系中两者的计时单位必定完全相同)，由于相对运动的缘故导致两者的计时单位已经产生差异，从而如果 K'系中的观察者使用所在参照系中的时钟所测得的某一时间间隔的**测量值(即测量所得到的数值)**是 $\Delta t\ \mathrm{s}(K')$，那么相对于 K 系中的观察者而言，K 系中的观察者用所在参照系中的时钟测得的该同一时间间隔的**测量值**就必定是$\dfrac{\Delta t}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\ \mathrm{s}(K)$。这与 K'系中的观察者采用与观察者相对静止的时钟对光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′再被 J′反射回 P′的位置变化所需要的时间间隔的测量结果(见公式(1.1a))完全相同。在此因为不同的观察者进行测量所得到的两个**测量值**所使用的计量单位是不同的，因此两者之间不具有直接的可比性，即如果不考虑计时单位，那么就不可能直接告知他人两个测量值哪个大哪个小。这就是说，由于 K 系中的观察者与 K'系中的观察者在测量 K'系中的某一个时间间隔 $\Delta t'$时使用的计时单位是不同的，所以测量所得到的**测量值**也是完全不同的。即由于所使用时钟的计时单位具有相对性，因此不同参照系中的观察者对同一时间间隔进行测量所得到的**测量值**(而非该时间间隔本身)具有相对性。但不能因此下结论说在不同的参照系中的观察者看来这同一

时间间隔 $\Delta t'$ 是不同的，由于两个参照系中的观察者测量的都是同一时间间隔，因此这里的不同仅仅是测量值的不同。而由于相对于 K 系中的观察者而言，K' 系中的观察者使用的时钟的计时单位较 K 系中的观察者使用的时钟的计时单位大，因此 K' 系中的观察者使用 K' 系中的时钟测得的时间间隔 $\Delta t'$ 较 K 系中的观察者使用的时钟对这同一时间间隔 $\Delta t'$ 进行测量所得到的**测量值**小，也即对时间间隔的测量值与计时单位成反比，从而 K 系及 K' 系中的观察者各自使用所在参照系中的时钟对某一参照系中发生的物质的变化过程所需要的时间间隔 $\Delta t'$ 所测得的**测量值**具有相对性，而不是时间间隔 $\Delta t'$ 本身具有相对性。现在我们来看一个具体实例，假定 K' 系相对于 K 系的运动速度为 0.866 C（C 为光速），则相对于 K 系中的观察者而言，K' 系中时钟的摆动周期 T' 与 K 系中时钟的摆动周期 T 之间的关系为 T' s(K')＝$2T$ s(K)，因此，这两个参照系中的观察者使用各自所在参照系中的时钟对同一时间间隔进行测量所得到的测量值必定不同。

图 1－8 是相对于 K 系中的观察者而言 K 系及 K' 系中的观察者使用各自参照系中的时钟的计时单位分别对同一时间间隔 $\Delta t'$（用图中的线段 AB 表示）进行测量所得到的相对于 K 系中的观察者的测量值的情况。图 1－8 中所标的 1 s(K) 是 K 系中的观察者使用的时钟的计时单位（而非时间本身的计量单位），1 s(K') 是 K' 系中的观察者使用的时钟相对于 K 系中的观察者使用的时钟的计时单位，显然，相对于 K 系中的观察者而言，K' 中的时钟的计时单位是 K 系中与之结构完全相同的时钟的计时单位的 2 倍（显然，对于计时单位为 $1/\sqrt{1-V^2/C^2}$ 倍的一般情况也可以获得完全类似结论），即 1 s(K')＝2 s(K)。从图中可见，K 系及 K' 系中的观察者对同一时间间隔 $\Delta t'$ 进行测量的行为并没有而且也绝对不可能改变时间间隔 $\Delta t'$ 本身（如图 1－8 中的线段 AB 所示）的“长短”，也就是说图中的 $\Delta t'$ 本身的“长短”对两位观察者而言是完全相同的，并不会因为观察者对其进行测量或两参照系之间的相对运动而发生哪怕是任何细微的变化或所谓的膨胀。但是由于两位观察者对 $\Delta t'$ 进行测量时使用的计时单位不同，所以两者经过测量所获得的测量值必定是不同的，如图 1－8 中 K 系中的观察者及 K' 系中的观察者使用所在参照系中的时钟对同一时间间隔 $\Delta t'$ 进行测量，所获得的测量值相对于 K 系中的观察者而言是不同的，相应的测量值分别为 3 s(K')、6 s(K)，由于这两个时间测量值使用的计时单位不同，因此两者不具有可比性，即我们不能根据两个数值的大小直接下结论说 3 s(K')＜6 s(K)，实际上有 3 s(K')＝6 s(K)。特别的，如果 K 系与 K' 系之间相对运动的速度为光速，那么相对于 K 系而言，K' 系中的观察者使用的时钟的计时单位为∞，从而，K' 系中的观察者对时间间隔 $\Delta t'$ 的测量值为 0，而时间间隔 $\Delta t'$ 本身显然并没有也不可能因为不同的观察者对其进行测量而发生任何变化。因此，时间测量值的相对变小并不必定意味着时间的相对膨胀而是空间相

对膨胀导致的时钟相对变慢现象的具体体现。由此可见，时间（或时间间隔）本身并非如相对论物理学家所普遍认为的是没有意义的概念而是时钟测量的对象，这一对象即使在我们没有对其进行测量时仍然在物质的存在及其变化过程中起着至关重要的作用，我们使用时钟对时间本身进行测量的过程仅仅是对其赋值的过程，时间本身并不会因此获得或失去任何东西并且也不会发生任何改变，显然，如果没有这一对象，我们使用时钟所做的任何测量都将毫无意义，从而相对论意义上的时间——被物理学家定义为时钟所测得的东西——也将失去其基础。但由于对物理方程而言只有量化了的时间（即时间的测量值）而非时间本身才是有用的概念，因此我们一旦获得了时间的测量值（如 K 系或 K' 系中的观察者分别获得的时间间隔 AB 的测量值 $6s(K)$ 或 $3s(K')$）就可以暂时忘却（但不能永远抛弃）时间（或时间间隔）本身（如图 1-8 中表示时间间隔本身的线段 AB）这一概念。当然，我们这里使用线段来表示时间间隔本身仅仅是为了将“逐渐展开的”时间间隔形象化并使之更易于被我们所把握。按常识的观念，时间间隔（或时间）本身并非现成的存在而是逐渐展开的，因此使用时钟对其进行测量也与使用量杆对空间中两点之间的距离的测量完全不同，从而我们使用的时钟在进行测量时也与时间间隔（或时间）本身的展开同步进行。显然，我们这里的讨论获得的结论与狭义相对论的理论体系及相关精密科学实验的结果是完全一致的。

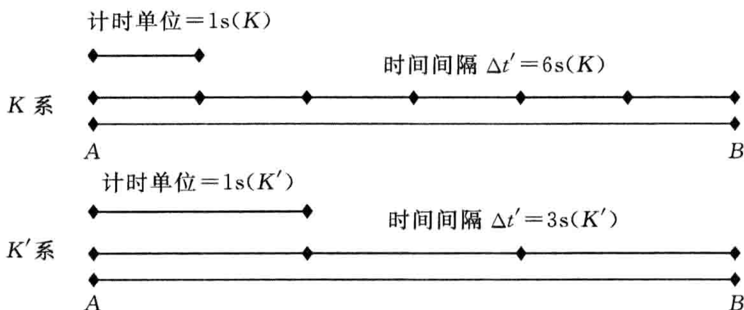


图 1-8　K 系及 K' 系中的观察者对同一时间间隔 $\Delta t'$ 进行测量所得到的测量值的相对性

现在我们来看相对论教材中可以看做是不同参照系中的观察者对同一时间间隔进行测量的例子的关于所谓时间膨胀的理想实验的分析，如美国物理学家阿瑟·贝塞在其现代物理教材中提到的一个理想实验（为便于叙述，已将其中的图示省略）：“为了说明时间膨胀是怎么来的，让我们来研究如图所示的特别简单的钟的运转情况，并考察相对运动对测量的影响。这个钟由在长度为 L_0 的直尺及其两端各装一面平面镜所构成。一个光脉冲在平面镜间来回反射，在一个平面镜上装上一个适当的仪器，每当光脉冲照射到该镜时，仪器就给出某种‘计时信号’（这类仪

器可以是涂在镜面上的光敏表面，当光脉冲照射时，它就给出一个电信号)，两个计时信号之间的原时 t_0 为 $t_0=2L_0/c$。如果直尺为1米，则 $t_0=2/(3\times10^8)=0.67\times10^{-8}$ 秒，因此，有 1.5×10^8 计时信号/秒。制作这样两个完全相同的钟，一个安放在宇宙飞船上，并且按钟内米尺垂直于飞船运动的方向放置；另一个静止放置在地面上。现在我们要问：地面上的观察者用相对于他静止的完全相同的钟，测得运动钟的两个计时信号之间的时间是多少。每个计时信号响应与速度为 c 的光脉冲从下反射镜到上反射镜、然后再返回的历程。在此往返过程中，整个钟在宇宙飞船中是运动着的，从地面上看来，光脉冲实际上走的是一条曲折路程(见图)，从下反射镜到上反射镜这段路用的时间为 $t/2$，光脉冲通过的水平距离为 $vt/2$，总距离为 $ct/2$。因为 L_0 是两反射镜之间的垂直距离，所以

$$\left(\frac{ct}{2}\right)^2=L_0^2+\left(\frac{vt}{2}\right)^2$$

$$\frac{t^2}{4}(c^2-v^2)=L_0^2$$

$$t^2=\frac{4L_0^2}{c^2-v^2}=\frac{(2L_0)^2}{c^2(1-v^2/c^2)}$$

得到

$$t=\frac{2L_0/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

由式可见，$2L_0/c$ 就是地面上的钟所记录的两计时信号间的时间间隔，所以

$$t=\frac{t_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\text{ 时间膨胀}$$

在地面上的观察者看来，宇宙飞船中运动的钟比地面上静止的钟慢的频率来计时①。”

显然，这里所说的“地面上的观察者用相对于他静止的完全相同的钟，测得运动钟的两个计时信号之间的时间是多少”的问题其实就是指地面上的观察者用所在参照系中的时钟对放置在宇宙飞船中的运动钟的两个计时信号之间的时间间隔进行测量所得到的测量值是多少的问题，显然，地面上的观察者在使用时钟对宇宙飞船中的运动钟的两个计时信号之间的时间间隔进行测量(对地面上的观察者而言该测量值为 t)的同时运动钟也对这一时间间隔进行了同步测量并获得了相应的测量值(对宇宙飞船中的观察者而言该测量值显然是 t_0)，即两个参照系中的观察者利用所在参照系中的时钟所测量的是同一时间间隔。而且，地面上的以及宇宙飞船中不同的观察者用所在参照系中的时钟对“运动钟的两个计时信号之间的时间”进行测量的行为以及两个参照系之间的相对运动不可能改变这一时间间隔

① [美]阿瑟·贝塞.现代物理概念[M].何瑁，等，译.上海：上海科学技术出版社，1984：10—12.

本身的“长短”。也就是说相对于地面上的观察者而言，“运动钟的两个计时信号之间的时间”间隔本身并没有发生膨胀，结果仅仅只是不同的观察者所获得的对这一时间间隔的测量值不同，因此结论与相对论是完全一致的。这种情况就如我们使用不同的长度单位如“米”或“分米”或“厘米”对某人的身高进行测量时会获得不同的身高测量值但却并不能改变这个人的身高本身一样，并且与我们使用不同的计时单位如“时”、“分”、“秒”对同一时间间隔进行测量的情况完全类似，所不同的是 K 系及 K' 系中的时钟的计时单位之间的换算关系则是由相对运动引起的而“时”、“分”、“秒”几个计时单位之间的换算关系是人为规定的。显然，图 1－8 中的两个参照系中的观察者所使用的时钟的计时单位与相应的测量值之间的乘积完全相同，即都等于时间间隔 $\Delta t'$，而在不同的参照系中用所在参照系的时钟所测得的时间的**测量值**的不同仅仅因为所使用的时钟的计时单位是相对不同的，而不存在其他原因。实际上这里涉及的时间间隔 $\Delta t'$ 可以是任何不在 K 系或 K' 系中的物质完成其变化过程所需要的时间，甚至可以是一个任意的时间间隔，由于所用时钟的计时单位不同，从而任何参照系中的观察者用所在参照系中的时钟对这一时间间隔进行测量所得到的**测量值**而且仅仅只是**测量值**不同，相应的讨论方法与上述完全相同，结论也基本一样，在此不再详细讨论。显然，如果将图 1－8 中的时间间隔 $\Delta t'$ 的两端向左右两个方向无限延长，并且标注一个确定的方向及原点，就可以得到一条标准的时间坐标轴，并且该时间坐标轴上的任何两点之间的“间隔本身”都没有发生膨胀，所不同的仅仅只是相对于 K 系中的观察者而言 K 系或 K' 系中的观察者使用所在参照系中的计时单位所测得的该“间隔”的量值，也就是说该时间坐标轴并没有发生膨胀，发生膨胀的仅仅是不同参照系中的观察者对时间坐标轴上的任意两个时刻进行测量所得到的测量值，如图 1－9 中是相对于 K 系中的观察者而言 K 系及 K' 系中的观察者使用各自参照系中的时钟的计时单位对同一无限长的时间段进行单位标注所得到的相对于 K 系中的观察者的时间坐标轴。

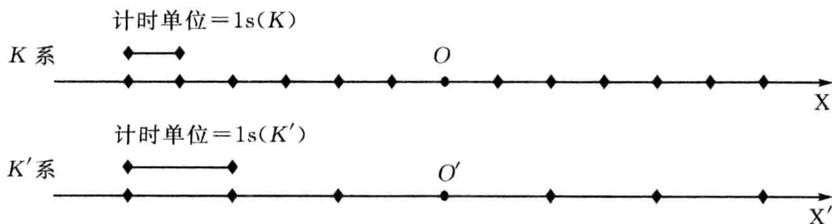


图 1－9　K 系及 K' 系中的观察者对同一无限长的时间段进行标注所得到的时间坐标轴

正如同我们采用不同的长度单位对同一条线段的长度进行测量所得到的**测量**

值必定不同但绝对不会导致该线段的真实长度发生变化一样，采用不同的计时单位对同一时间间隔进行测量同样不会导致该时间间隔本身的变化而只能改变对该时间段的测量结果，从而赋予该时间段以不同的**测量值**，而相对论中所涉及的时间完全是通过这种方式获取的。比如同样是1分钟，潜泳的人由于心跳频率加快，其生物钟的频率与正常情况时相比同样变快，这样潜泳的人的生物钟的计时单位也比正常情况时变小，这人的生物钟的1分钟的计时单位也比正常情况变小了，他的生物钟用1分钟的计时单位对1分钟时间间隔的测量显示该时间间隔的**测量值可能**远不只1，他会感觉到该时间间隔可以等同于以往的10分钟，但1分钟的时间段并不会因为此人的生物钟的度量而发生了改变；通常我们形容的度日如年的心理感受与此类似，当我们心情处于极度烦躁、极度沮丧、极度悲伤等极端的心理状态时，我们的生物钟的频率同样会受到影响，即生物钟频率变快，对同样的一个时间段进行测量所测得的测量值变大，从而对于我们通常情况下感觉到需要不太长的时间就可以完成的变化过程（比如一天的时间段），此时会感觉到需要很长的时间才能完成，甚至会产生时间已经停滞的感觉，也就是说我们的生物钟很容易受到心理状态甚至经验的左右从而影响到我们对同一时间段的估测。这也就是我们必须使用时钟这一更加客观的计时工具，来代替我们心理上主观的对时间的估测行为对时间进行测量的最主要的原因。实际上对任一宏观物质对象的某一物理量进行测量的过程就是对该物质对象的相应物理量进行赋值的过程，而相应的测量行为不可能改变该物质对象的物理量本身。由此可以得到以下结论：

【结论二】 由于K系与K'系之间的相对运动，因此相对于K系中的观察者而言，K'系中的时钟的频率γ'较K系中的时钟的频率γ按$\sqrt{1-V^2/C^2}:1$的比例减小了，从而与K系中的时钟的计时单位相比，K'系中的时钟的计时单位相对于K系中的观察者而言按$1:\sqrt{1-V^2/C^2}$的比例增大了，因此对于K'系中任何物质完成其变化过程所需要的（而不是任何其他意义或形式的）时间间隔$\Delta t'$，K'系中的观察者用相对于其静止的时钟所测得的该时间间隔$\Delta t'$的测量值，较K系中的观察者用相对于其静止的时钟所测得的该时间间隔$\Delta t'$的测量值按$\sqrt{1-V^2/C^2}:1$的比例减小了，这也就意味着只有时间间隔的测量值按比例相对减小（即膨胀），而时间间隔$\Delta t'$本身并没有也不可能因为使用不同的计时单位对其进行测量而发生任何变化。显然，这一结论具有相对性，即相对于K'系中的观察者而言也有同样的结论。

由此可以推论出任何"时间及时间间隔本身"都不具有相对性的结论。而由于每一个参照系中的时钟的计时单位不同，因此各参照系中的观察者使用所在参照系中的时钟对这一时间的测量值具有相对性，也就是说我们可以从各参照系中的

观察者对这一时间段的测量值以及各参照系之间的洛伦兹变换中通过分析分离出这一公共时间段,这一公共时间段就可以作为绝对时间的实例,而由于绝对时间没有任何数值,因此可以把任何一个参照系中对时间的测量值作为绝对时间,一旦绝对时间这一标准确定下来后其他参照系中的时间的测量值只能以此为标准来加以确定。需要说明的是这里的结论与所有狭义相对论教材中的结论是有所不同的,但这里并没有因此而否定狭义相对论中的相关结论,而是要厘清其中关于时间的模棱两可的叙述,使相应的概念更加清晰、明了,使相对论的内容更加容易理解。

1.2.3 从时钟相对变慢现象无法推论出时间本身相对变慢(或膨胀)的结论

上面提到的"时钟变慢"现象又常常被相对论物理学家们不假思索地直接称做或等同于"时间变慢"或"时间膨胀"现象,并将其看做是时间的性质,而对于这样做的合理性以及时间是如何发生膨胀的,应该如何理解时间膨胀现象则没有任何人仔细考虑过,这或许是由于当今科学界竞争激烈,主流科学家可能认为与那些经过逻辑的推理得到的实证的科学结论相比这种思考是浪费时间、没有意义的缘故。我们知道,在相对论中所谓"时钟变慢"是指时钟的周期变长,确切地说是时钟的钟摆(或振子)完成一个周期的摆(振)动所需要的时间增加从而摆(振)动频率减小,显然,时钟钟摆的摆动周期变大并不必然意味着时间变慢;反之,时钟周期变短也只是意味着时钟的钟摆(或振子)完成一个周期的摆(振)动所需要的时间减小从而摆(振)动频率增加而并不意味时间变快。这就是说时钟变慢与"时间变慢"没有必然的逻辑关系,不可能必然推论出"时间变慢"的结论。但令人不解的是物理学家却都将时钟变慢现象等同于时间变慢,如对于 μ 介子在高速运动的状态下寿命变长的现象,英国物理学家保罗·戴维斯在其论著中这样叙述:"实验的结果不容置疑:钟受到运动的影响。但是,为什么物理学家们坚持时间被延伸的结论呢?常见的答案是:时间(至少在物理学家看来)是时钟测量的。当然,为了统一起见,我们必须假定所有的钟都以相同的方式受到运动的影响;否则,我们会更倾向于认为受影响的是钟而不是时间本身[①]。"对于高速运动的火箭中的一切物质的变化过程相对变慢现象,俄罗斯物理学家在其著作中这样描述道:"在一个高速运动的火箭里的钟表走得慢些,宇航员的心跳也变慢,身体内的生物化学过程也变慢,原子中电子的振荡频率也变慢等等,所有的物理过程都变慢了,因此时间本身也不例外。宇宙飞船的速度越快,时间走的越慢。如果火箭的速度达到光速,那么时间就将趋于停止,所有的物理过程都变得无限长[②]。"又如,著名物理学家布赖恩·格林(Brain

---

① [英]保罗·戴维斯.关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M].崔存明,译.长春:吉林人民出版社,2002:60—61.

② [俄]伊戈尔·诺维科夫(Igor D. Novikov).时间之河[M].吴王杰,陆雪莹,闵锐,译.上海:上海科学技术出版社,2001:55.

Greene)在其论著中的观点："我们看到了，光速不变性意味着运动的光子钟比静止的光子钟的'嘀嗒'节律慢，而根据相对性原理，这不仅对光子钟是正确的，也适用于任何种类的钟——也就一定适合于时间本身。运动的观察者的时间过得比静止观察者的慢①。"再比如对于物理学家为何会将时钟变慢现象等同于时间变慢的原因，物理学家费曼所持的观点与大多数物理学家的观点基本相同，费曼在其著作中这样写道："如果所有的运动时钟都走得比较慢，如果测量时间的任何方法都给出较慢的时间进程，那么，我们就只好说，从某种意义上说，在一艘宇宙飞船上，时间本身看来就比较慢②。"

由此可见，这些物理学家(实际上是几乎所有主流物理学家)显然是把时间完全等同于物质的变化过程、等同于时钟指针的偏转或者时钟指示值的变化，并且没有经过任何证明而不假思索地直接将时钟变慢现象与时间变慢等同起来。特别是爱因斯坦在对狭义相对论以及广义相对论的论述中从一开始就尽可能回避时间本质的定义，而采取一种实用的操作方法将时间完全等同于时钟的测量值，而爱因斯坦之后的所有物理学家都不假思索地继承了爱因斯坦的做法。正如美国著名物理学家布赖恩·格林所说的："很难为时间下一个抽象的定义——那常常会把'时间本身'卷进来，要么就得在语言上兜圈子。我们不想那么做，而采取一种实用的观点，将时间定义为时钟所测量的东西③。"又如英国物理学家戴维斯关于相对论中时间概念的叙述："爱因斯坦宇宙中的物理变化的唯一有意义的方法是忘却时间'本身'，同时仅仅依靠真实的物理时钟的读数测量变化过程，而不是依靠某种不存在的'时间本身'观念④。"我们不禁要问，既然时间本身看不见、摸不着，并且没有任何标记、没有任何单位，那么我们是如何知道、又是如何能够检测到时间自身所发生的所谓的膨胀的呢？实际上，时钟所测量的对象本身并不等同于时钟所测得的数值，就如同线段虽然可以定义为直尺所测量的对象，但直尺所测得的数值并不等同于线段一样。因为使用不同的长度单位对同一线段(同一对象)进行测量所得到的数值是不同的；也就是说，物理学家们将时间与物质的变化过程、时钟指针的偏转(时钟显示值的变化)之间等同起来从而根据时钟变慢公式推论出所谓的时间变慢或时间膨胀的做法显然没有进行、实际上也不存在严格的逻辑推理，而且在相对论中也只是证明了由空间的相对膨胀导致的时钟频率的相对减小、计时单位的相对增大及时间测量值的相对变小而从未直接给出过时间(本身)相对膨胀的任何证明(因为实际上我们只有时钟相对变慢公式而根本没有时间相对变慢或膨胀公

① [美]B. 格林. 宇宙的琴弦[M]. 李泳，译. 长沙：湖南科学技术出版社，2002：39.

② [美]R. P. 费曼. 费曼讲物理：相对论[M]. 周国荣，译. 长沙：湖南科学技术出版社，2012：67.

③ [美]B. 格林. 宇宙的琴弦[M]. 李泳，译. 长沙：湖南科学技术出版社，2002：35.

④ [英]保罗·戴维斯. 关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M]. 崔存明，译. 长春：吉林人民出版社，2002：242.

式),并且所有相对论物理学家所提到的关于时间的相对膨胀的所谓的证明都仅仅是根据时钟变慢公式的数学意义所作的想当然的、简单的类比推理,是在没有对其物理意义作深入的分析、思考的情况下所得出的结论,因此是完全没有根据的,但时至今日却很少有人对这一概念产生过怀疑,作者以为主要原因在于人们并没有从本质上真正理解这一概念,如美国著名物理学家布赖恩·格林关于时间及空间的理解方面的反思:“空间和时间的相对性是一种令人惊奇的结论。我已经了解它25年了,但即使是现在,每当我坐下来静静地思考它时仍会感到迷惑[①]。”显然,物理学家布赖恩·格林对空间及时间的相对性的困惑几乎是所有物理学界对这一概念的认知情况的写照。实际上爱因斯坦在相对论中直接从时钟变慢公式引出时间膨胀的概念时并没有对其进行过深入的分析及严格论证,因此可以肯定地说,自爱因斯坦创立相对论起至今甚至包括爱因斯坦本人在内的所有物理学家中,还没有人真正理解时间膨胀的意义,并且到今天为止也没有任何科学实验向我们直接证明时间的膨胀,所有相关实验都只是证明了物质变化过程所需要的时间因变化路径的相对增大而增大的事实。通过以下几个方面的详细分析我们可以发现,“时间膨胀”的概念是一个错误的概念(对此,在上面实际上已经有过简单的讨论,只不过没有重点进行详细论述),是对上述理想实验的草率结论,并没有获得任何证明,由于相对论的最重要的内容是其数学结构,而对其数学结构中各物理量的任何解释都仅仅是其相应的数学结构之外的内容,不论这种解释正确与否都不会对其数学推理产生任何影响,从而在相对论中将时钟变慢现象错误地理解为时间膨胀也不会影响到其应用。其实相对论乃至现代物理学中对时间的极度混乱的理解都源自“时间变慢”或“时间膨胀”这一错误概念,这一概念甚至对人类关于时间本质的理解带来了重大影响,下面就将对此进行详细分析。

在进一步的讨论之前,首先需要明确两个概念。一是膨胀的概念,所谓膨胀是指事物的规模或指标的整体性扩大或增大,是一种整体性效应。比如温度升高时物体所占据的空间范围的增加、发生经济危机时的通货膨胀(纸币流通条件下因货币供给大于货币需求而导致的货币贬值)等,又如爱因斯坦在狭义或广义相对论中提出的,由于相对运动或空间的弯曲造成的不同参照系中时间数轴上的任意两点之间间距的相对值增大的所谓时间膨胀,这是时间数轴的整体性膨胀,按照爱因斯坦的理解也可以称之为时间自身的整体性膨胀。这种整体性的膨胀显然可以不依赖于具体的物质变化过程,但可以在具体的物质变化过程中体现出来,亦即时间及其相对膨胀完全可以脱离具体的物质变化过程而存在。另外是关于位移与时间间

① [美]布赖恩·格林(Brain Greene).宇宙的结构——空间、时间以及真实性的意义[M].刘茗引,译.长沙:湖南科学技术出版社,2012:51.

隔之间存在的关系,我们知道,对于速度 V 为恒定的匀速直线运动的物体,根据位移量 ΔS 与速度 V 的关系式:$\Delta S=V\Delta t$,当物体的位移量 ΔS 按一定的比例 k 增加,即 $\Delta S\rightarrow\Delta S'=k\Delta s$ 时,相应的物体完成整个位移所需要的时间 Δt 也会按相同的比例 k 增加,即 $\Delta t\rightarrow\Delta t'=k\Delta t$,从而有 $\Delta t':\Delta t=\Delta S':\Delta S=k$,这一现象显然与时间膨胀没有任何关系。因为这里的时间间隔 Δt 的增加完全是直接由物体的位移量 ΔS 的增加(而不是与位移量增加完全无关的因素)造成的,这显然是时间累计值的增加而非时间的整体性增大(即膨胀),这一时间间隔的增加显然只有当变化过程真正发生以后才能够产生。而在上面的分析中我们已经看到相对论中所谓的"时间膨胀",显然完全是因为空间的膨胀造成的物体位移量的增加,从而导致物体完成其空间位置的变化过程需要的时间的增加的结果(其实这些内容在上面也进行过详细的分析),从而同样也是由于位移量的增加导致的时间累计值的增加而非时间的整体性增大(即膨胀),因此必定与时间膨胀完全无关。下面我们来看在两个参照系中出现的物质完成其变化过程所需要的时间具有相对性的情况。

通过上面的讨论我们可以发现,在相对论中经常提到的所谓"时间膨胀"现象其实与"通货膨胀"现象极其类似,因此可以将两者进行类比。正如是否发生了"通货膨胀"现象必须结合对所需购买商品的数量及因此所要支付的货币量之间的比较才能得出正确的结论一样,到底有没有发生"时间膨胀"现象也必须结合对描述"物质完成同一变化过程所需要的时间间隔"的公式(1.3)及描述"物质完成同一变化过程所经过的路径"的公式(1.4)两者意义的详细讨论才能得出正确结论。其实在所有关于狭义相对论的教科书中都只是把公式(1.3)单独拿出来进行简单、直接的推论而得到"时间膨胀"的概念,而根本没有把公式(1.3)与公式(1.4)结合起来进行详细论述,这才是得出"时间膨胀"这一错误概念的一个重要原因。由【结论一】可知,从 K 系中的观察者看来光脉冲完成从 P′到 J′再到 P′的变化过程所需要的时间间隔,较光脉冲完成从 P 到 J 再到 P 的变化过程所需要的时间间隔增大,具体由公式(1.3)描述,仅仅是因为光脉冲从光脉冲发射—接收器 P′射向平面镜 J′再被 J′反射回 P′的总行程,较光脉冲从光脉冲发射—接收器 P 射向平面镜 J 再被 J 反射回 P 的总行程增加了,具体由公式(1.4)描述,而不是因为"时间膨胀"了,从而要完成这段增大的路径同样需要更大的时间间隔,如果这种情况可以称做"时间膨胀",那么在任何匀速直线运动中因为物体的运动路径的增加导致物体完成相应的路径所需要的时间间隔增加的情况都可以称作"时间膨胀"。由图 1-3 及公式(1.4)可知,由于相对于 K 系中的观察者而言从光脉冲发射—接收器 P′射向平面镜 J′再被 J′反射回 P′的光脉冲的运动路径的长度 $2L'$ 较 $2L$ 增加(膨胀)了,而光脉冲相对于任何惯性系的观察者的速度都是恒定的 C,从而相对于 K 系的观察者光脉冲完成从光脉冲发射—接收器 P′到平面镜 J′再被 J′反射回 P′的位置变化所需

要的时间间隔必定按相同的比例增加了。这种情况可以用下面的关于“通货膨胀”的简单类比加以说明：假设在购买力不变的情况下某种商品的单价是一个常数(即购买单位数量的该种商品所需支付的货币的量是恒定的，从而单位货币所能购买到的该种商品的数量也是恒定的)。这样，所要购买某种商品的数量与因此需要支付的总金额(或货币)之间的关系式为：

$$Q=(1/P)\cdot T$$

式中：Q 为所要购买商品的数量，P 为所要购买商品的单价，$1/P$ 则为单位货币购买某种商品的能力，T 为所需要支付的总金额。显然以上公式与光脉冲的位移公式(1.2)是完全一致的。其中 Q 对应于光脉冲的位移 L，$1/P$ 对应于光速 C，T 对应于光脉冲完成其位移所需要的时间间隔 Δt。由此关系式可见，由于所要购买的商品的单价是常数，当该种商品的购买数量 Q 因需要按一定的比例 k 增加时，所需要支付的总金额 T 肯定也会按相同的比例 k 增加，即所需要购买的商品数量 Q 的增加是所需要支付的总金额 T 增加的唯一原因，除此外再没有其他原因，也即所有购买商品所需要支付的总金额 T 的增加都只能归结(或还原)为所需要购买的商品数量 Q 的增加，从而有：

$$kQ=(1/P)\cdot kT$$

即

$$Q'=(1/P)\cdot T'$$

其中 $Q'=kQ$，$T'=kT$。显然公式 $T'=kT$ 与公式(1.3)、公式 $Q'=kQ$ 与公式(1.4)的形式完全相同、意义也基本相似，并且显然具有如下关系：

$$T':T=Q':Q=k$$

这一点也与上面1.2.1节中的分析得到的结论完全相似。由于该类商品的单价 P 并没有发生改变，因此这里并没有发生通货膨胀。反之，假定如果发生了通货膨胀，那么，与发生通货膨胀前的情况相比，在发生通货膨胀时所需要支付的总金额 T 按同一比例增加时所要购买的商品数量 Q 肯定不会按相同的比例增加；也就是说在发生通货膨胀时，所需要支付的总金额 T 的增加并不是因为所要购买的商品数量 Q 的增加而导致的，而是与之无关的因素(如经济等原因导致货币本身的购买力的下降)造成的。即所需要支付的总金额 T 的增加并不意味着必定发生了通货膨胀，但通货膨胀却必然导致所需要支付的总金额的增加，可见通货膨胀只是所需要支付的总金额 T 增加的充分条件而非必要条件。

我们再来看一个例子，假设某一乘客乘坐一辆出租车相对于地面以极高的速度 V 向某地疾驰，我们将地面称做 K 系、出租车称做 K' 系，同时假定出租车是按经历的时间收费并且费率是恒定的，经过一段时间后出租车到达目的地。相对于 K 系中的观察者而言，如果按 K 系中的计价器所计出租车收费单价为 T 元(K)，那么按 K' 系中与 K 系的结构及费率完全相同的计价器所计出租车实际收费单价

应该为$T'=\frac{T}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$元$(K)$，即按$K$系中的计价器所计收费单价应该比$K'$系中的计价器所计收费单价高，但我们不能因此说相对于K系中的观察者而言K'系中的货币发生了相对的通货膨胀，而是由于相对于K系中的观察者而言，K'系所在空间的相对膨胀导致K'系中的时钟的计时单位相对增大，因此按K'系中的计价器所计费用单价T'比K系中的计价器计费单价T高。以此类推，在时间发生膨胀的情况下物质完成其变化过程需要的时间增加时物体完成相应的路径变化并不会按相同的比例增加。所谓的时间的相对膨胀也完全不应该是因为变化路径的相对增加导致的完成这一路径变化所需要的时间按相同比例相对增加，而应该是因为运动引起(与空间的相对位移无关)的时间自身的某种相对变化，也就是说时间膨胀也是相对于K系的观察者光脉冲完成从光脉冲发射—接收器P′到平面镜J′再被J′反射回P′的位置变化所需要的时间间隔的增加的充分条件而非必要条件；而相对于K系中的观察者光脉冲完成从光脉冲发射—接收器P′到平面镜J′再被J′反射回P′的位置变化所需要的时间间隔的增加完全是由于相对于K系中的观察者而言从光脉冲发射—接收器P′射向平面镜J′再被J′反射回P′的光脉冲的运动路径的增加(而非其他原因)造成的。可以说因为两个参照系之间的相对运动直接引起了三维空间的相对膨胀(而不是同时直接引起时间的相对膨胀)，从而导致光脉冲的运动路径的相对增加，这就是光脉冲完成相应的空间位置的改变所需要的时间间隔相对增加(而不是任意的时间间隔的膨胀)的唯一原因，即相对运动→动系中的三维空间相对于静系而言发生膨胀→任何物体完成同样的空间位置变化的路径相对增大→必然的而且仅仅只是所有物体完成相应的空间位置的变化所需要的时间均按相同的比例相对增大。因此我们可以将由于光脉冲完成变化过程所需要时间的相对增加而导致的过程相对变慢(包括时钟变慢)的现象完全还原(或归结)为光脉冲的运动路径的相对增加乃至三维空间的相对膨胀而不是时间的相对膨胀，从而相应的理想实验归根结底只是证明了因为三维空间的相对膨胀而导致的光脉冲的运动路径的相对增加，而非证明了时间的相对膨胀，甚至包括至今所有关于运动的时钟摆动(或振动)频率变慢以及高速运动的粒子平均寿命延长的实验都只是证明了运动的参照系中的三维空间的相对膨胀现象的真实效应，并没有真正给出所谓时间膨胀的证明。这里所说的物体完成同样的空间位置的变化所需要的时间相对增大是有原因的，其原因就是物体所在三维空间的相对膨胀，而这显然不是所谓的时间膨胀的原因。从而时钟变慢既无法必然推论出时间变慢的结论，同样也不是时间变慢的结果，这也就意味着在上述过程中并没有发生所谓的"时间膨胀"现象。

另外，假定同一个完全相同的物质变化过程分别在K系与K'系中发生，该变

化过程用物理量 $A=A(t)$ 表示。那么相对于 K 系中的观察者而言，如果该变化过程在 K 系中发生，则该变化过程可以用 $A=A(t)$ 描述；而如果该变化过程在 K' 系中发生，则该变化过程可以用 $A'=A(t')$ 进行描述，其中 $t'=\sqrt{1-V^2/C^2}t$。也就是说，相对于 K 系中的观察者，K' 系中发生的某一变化过程是 K 系中发生该变化过程的变慢的过程或者也可以说是该变化过程的"慢镜头"。例如分别把发生在 K 系及 K' 系中的该同一变化过程用图 1-10 中的直线 $A=kt$ 及 $A'=kt'=k\sqrt{1-V^2/C^2}t$ 表示。从图 1-10 中可见，相对于 K 系中的观察者而言，由于在 K'

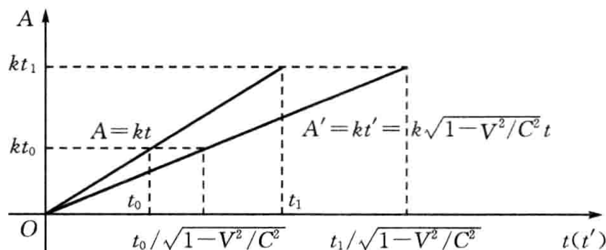


图 1-10　相对于 K 系中的观察者，同一变化过程分别在 K 系及 K' 系中的表达式示意图

系中的观察者使用所在参照系中的时钟获得的时间测量值 t' 较 K 系中的观察者用所在参照系中的时钟获得的时间测量值小，从而 K' 系中的变化过程要达到与 K 系中的同一变化过程在 t 时刻相同的状态需要更长的时间间隔 $t/\sqrt{1-V^2/C^2}$，其原因是 K' 系所在空间因为与 K 系之间的相对运动而发生了相对膨胀，从而物质完成其变化过程所经历的路径增大的缘故，而不是由于 K' 系中原本为 $t'=\sqrt{1-V^2/C^2}t$ 的时间间隔因时间膨胀导致其变为时间间隔 t，而由于相对于 K 系而言 K' 系中的空间因为相对运动发生了膨胀，从而 K' 系中的时钟频率变小，进而导致时钟的计时单位增大，使得 K' 系中的观察者使用时钟测量所在参照系中的物质完成变化过程所需要的时间的测量值相对减小。而当 K 系中发生的变化过程已经完成，或者某一时刻 t 的状态已经达到时 K' 系中发生的同一变化过程还未完成，或者在某一时刻 t 时状态还未达到与 K 系发生的同一物质变化过程相同的状态，从而相对于 K 系中的观察者而言在 K' 系中物质完成同一变化过程（或达到同一状态）所需要的时间更长，可见是该变化过程而不是时间因此变慢了，也就是说相对于 K 系中的观察者而言 K' 系中的时间 t' 并没有发生膨胀（或变慢）。在此需要强调说明的是，由于在惯性系中光速对任何参照系中的观察者而言都具有恒定值，因此相对于静系中的观察者而言当经过任何相等的时间间隔时在任何参照系中进行着的光波运动的路程都完全相等，这也就意味着对任何惯性系而言时间及

其特性都没有发生任何改变，因此，时间不可能发生相对膨胀。

实际上不同惯性系中的观察者对发生在某一惯性系中的同一物质变化过程需要的时间间隔进行测量的情况也仅仅只是证明了时间测量值的相对性而根本不可能证明时间的相对膨胀现象，如爱因斯坦在其狭义相对论著作中采用的关于所谓的"时间膨胀"的相关推理："设两惯性系为 S 系和 S' 系，它们相应的笛卡尔坐标轴彼此平行，S' 系相对于 S 系沿 x 方向运动，速度为 v，且当 $t=t'=0$ 时，S 系与 S' 系的坐标原点重合。设在时刻 $t=t'=0$ 时，一球面电磁波离开原点 O_1O' 且以速度 C 行进，根据相对性原理及光速不变原理，则有 $x^2+y^2+z^2=C^2t^2$，$x'^2+y'^2+z'^2=C^2t'^2$，以此可以推论出洛伦兹变换：$x'=\gamma(x-ut)$，$y'=y$，$z'=z$，$t'=\gamma(t-ux)/C^2$）。……在式 $t'=\gamma(t-ux/C^2)$ 中，将 $x=Ct$ 带入可得 $t'=\gamma(t-ut/C)=\gamma(Ct-ut)/C$，再将 $Ct=x$ 带入可得 $t'=\gamma(x-ut)/C$，式中 $x-ut$ 是自 S 系观察 O' 点与 P 点的距离，$(x-ut)/C$ 是自 S 系观察光信号由 O' 点到 P 点所用的时间间隔，令这一时间间隔为 Δt，则自 S' 系观察时这一时间间隔为 $\Delta t'=x'/C=t'$，显然有 $\Delta t'=\gamma\Delta t$，也就是时间膨胀。同样 $t=\gamma(t'+ux'/C^2)$ 中，将 $x'=Ct'$ 带入可得 $t=\gamma(t'+ut'/C)=\gamma(Ct'+ut')/C$，再将 $Ct'=x'$ 带入可得 $t=\gamma(x'+ut')/C$，式中 $x'+ut'$ 是自 S' 系观察 O 点与 P 点的距离，$(x'+ut')/C$ 是自 S' 系观察光信号由 O 点到 P 点所用的时间间隔，令这一时间间隔为 Δt，则自 S 系观察时这一时间间隔为 $\Delta t'=x/C=t$，显然有 $\Delta t'=\gamma\Delta t$，由此可知，时间膨胀也是相互的[①]。"

在此，爱因斯坦想要证明的所谓的时间膨胀显然是指最一般意义的或抽象的时间（或时间间隔）的膨胀。我们知道，最一般意义的或抽象的时间间隔与物质完成其变化过程所需要的时间间隔是完全不同的两个概念，而爱因斯坦在此显然只是证明了后者具有相对性，对于前者则从未给出过任何证明，即使是通常被认为借助关于时间的洛伦兹变换推论出的具有一般意义的所谓的时间膨胀公式，在推导过程中也仅仅考虑了关于时间坐标的洛伦兹变换，根本没有考虑这一公式在联立的空间—时间坐标的洛伦兹变换中的综合物理意义，而据此要推论出具有一般意义的关于时间膨胀的结论显然是不可能正确的，这一点在上面的讨论中已经提到过。从上述爱因斯坦关于"时间膨胀"的推理过程我们可以清楚地看到，该推理过程中所提到的时间间隔 Δt 或 $\Delta t'$ 就是我们在对本节【理想实验 1】及【理想实验 2】的分析中所说的物质完成其变化过程所需要的时间间隔（即光信号由 O' 或 O 点到 P 点所用的时间间隔），由于在 $t=t'=0$ 时 S 系与 S' 系的坐标原点 O 及 O' 是重合的，这时一球面电磁波（即光信号）离开坐标原点 O、O'，从而光信号从 O' 点到 P 点

---

① [美]阿尔伯特·爱因斯坦. 相对论——广义与狭义相对论全集[M]. 易洪波，李智谋，译. 南京：江苏人民出版社，2011：73—76.

与从O点到P点的距离是完全相等的，这样光信号完成从O'点到P点与从O点到P点所需要的时间间隔也完全相等，也就是说分析中涉及的是两个不同的参照系中的观察者对同一个时间间隔$\Delta t'$（或Δt）的观察。而根据1.2.2节中获得的【结论二】可知，由于存在相对运动的不同的参照系S系与S'系中的时钟的计时单位是不同的，因此不同参照系中的观察者使用所在参照系中的时钟对同一时间间隔$\Delta t'$进行测量所得到的时间间隔的**测量值**也不相同，即如果在S'系中的观察者用所在参照系中的时钟进行测量所得到的这段时间间隔的测量值是Δt，那么在S系中的观察者用所在参照系中的时钟进行测量所得到的这段时间间隔的测量值是$\Delta t'$，显然$\Delta t' \neq \Delta t$。相对于S系中的观察者，由于S'系与S系中的时钟的计时单位之比是$\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$，即如果将$S$系中的时钟的计时单位设定为1，那么对于$S$系中的观察者而言在$S'$系中与$S$系中结构完全相同的时钟的计时单位则为$\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$，我们知道计时单位与相应的测量值的乘积就是对其进行测量的时间间隔$\Delta t'$本身的值，即有$\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}} \cdot \Delta t = 1 \times \Delta t' = \Delta t'$，则对于$K'$系中的一段时间间隔，$K$系中的观察者用$K$系中的时钟的计时单位1s进行测量得到的测量值是$\frac{\Delta t}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$，而$K'$系中的观察者使用$K'$系中的时钟的计时单位（相对于$K$系中的观察者为$\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ s）进行测量得到的测量值为Δt，从而有：**时间测量值**Ⅰ×**计时单位**Ⅰ=**时间测量值**Ⅱ×**计时单位**Ⅱ，也就是说因为不同参照系中的观察者所使用的时钟的计时单位不同，因此对同一时间间隔$\Delta t'$进行测量所获得的测量值也不相同，而非被测量的时间间隔$\Delta t'$本身发生了改变的缘故，即时间间隔$\Delta t'$本身并不会因为（使用不同的计时单位）对其进行测量而发生变化，这里的不同仅仅是测量值的不同，因此时间间隔$\Delta t'$本身并没有发生膨胀，这一点与我们上面讨论的结果完全一致。

此外，我们还可以用反证法证明实际上并没有发生爱因斯坦所说的与时钟的相对变慢现象完全不同的所谓时间的相对膨胀：假定S系及S'系是相对运动的两个惯性参照系，同时，相对于S系中的观察者而言当S系中经过了任意的一段时间间隔Δt时与之相应的S'系中经过的时间间隔则是$\Delta t'$，并且存在关系$\Delta t' = \sqrt{1-V^2/C^2}\,\Delta t$，即$S'$系中的时间间隔$\Delta t'$相对于$S$系中的时间间隔$\Delta t$按比例$\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$发生了（可以观测到的）相对膨胀；由前面的讨论可知，该效应显然不

是由空间的相对膨胀所引起从而与由空间的相对膨胀导致的时钟相对变慢现象(以及由此引起的时钟计时单位的相对增大、时间间隔测量值的相对变小)是完全不同的。考虑到 S'系与 S 系之间的相对运动还必然导致相对于 S 系中的观察者而言 S'系所在空间中任意两点之间的距离按比例$\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$发生了相对膨胀从而使得 S'系中的时钟的计时单位相对于 S 系中的时钟的计时单位也按完全相同的比例相对增大。这样,结合这两种效应的共同作用可以推论出:相对于 S 系中的观察者而言如果 S'系中的观察者使用所在参照系中的时钟对时间间隔 $\Delta t'=\sqrt{1-V^2/C^2}\Delta t$ 进行测量(与仅仅考虑由空间的相对膨胀引起的时钟相对变慢效应所造成的对时间间隔的测量值影响的情况相比),该测量值必定会按比例 $\sqrt{1-V^2/C^2}:1$ 减小。而如果假定 S 系及 S'系中的两时钟已校对好,则由于时间的相对膨胀,相对于 S 系中的观察者而言 S'系中的观察者使用所在参照系中的时钟对时间间隔 $\Delta t'$进行测量获得的测量值(即相对于 S 系中的观察者而言 S'系中时钟的指针所指示的时间)显然应该为 $\Delta t'=\sqrt{1-V^2/C^2}\Delta t\cdot\sqrt{1-V^2/C^2}=(1-V^2/C^2)\Delta t$ 而非通常所说 $\sqrt{1-V^2/C^2}\Delta t$,该时间间隔测量值 $\Delta t'$较理论计算的时间间隔 $\sqrt{1-V^2/C^2}\Delta t$ 相比明显要小,这显然与相对论的结论相冲突,也与相关的物理实验不相符,因为相对论的计算值以及精确的物理实验均表明该值为 $\sqrt{1-V^2/C^2}\Delta t$。从而相对于 S 系中的观察者而言 S'系的时间要么没有发生相对膨胀、要么这种相对膨胀无法被我们所测量,而如果是后者,那么时间发生膨胀的假定就是毫无意义的。可见,从根本上来说只有由空间的相对膨胀引起的时钟(或者物质的变化过程)相对变慢现象而完全没有由相对运动引起的时间相对变慢现象,即两个参照系之间的相对运动必然会导致相对于静系中的观察者而言动系中的时钟相对变慢、时钟的计时单位必定相对增大、对某一确定时间间隔的测量值相对减小,而这就是我们所能观察到的关于时钟计时方面的所有内容,所谓的时间因相对运动而发生相对膨胀的结论是错误的、没有意义的,因此,相对论中所说的时钟测量值的相对膨胀完全而且只能是由于空间的相对膨胀造成的,与时间的相对膨胀(或变慢)完全无关。

由此可见,爱因斯坦在其相对论中由同时性的相对性以及时钟相对变慢公式不假思索、不进行任何论证就直接将时钟相对变慢与时间相对变慢等同起来的做法是草率的。我们认为,爱因斯坦在推理过程中之所以会得到“时间膨胀”的错误结论,一方面是由于在推理过程中完全没有注意到不同参照系中的时钟的计时单位因为相对运动已经发生了改变(虽然在相对论的其他论述部分,爱因斯坦也提到过存在相对运动的不同参照系中的时钟会因为相对运动而导致计时单位发生改变

的看法),从而将用时钟对时间间隔进行测量获得的**测量值**的不同归结为时间的膨胀而不是归结为计时单位的变化;另一方面由于他将使用时钟测得的时间间隔的**测量值**完全等同于时间间隔乃至时间本身(而实际上两者是完全不同的概念)的缘故。另外,在关于狭义相对论的论述中也有人提到所谓的"时间膨胀"是指静系中的观察者所观察到的动系中的时间(本身)的"单位间隔"因两参照系之间的相对运动而发生了变化。其实时间本身并不存在单位间隔,因为我们只能使用时钟对时间进行较为精确的测量,所谓的时间的单位间隔其实应该被称做时钟的计时单位,而时钟的计时单位是完全外在于时间的单位间隔的,这种单位间隔完全因为我们要量化时间的需要通过时钟强加给时间的,当我们用时钟的一个个周期性的变化过程作为计时单位对时间进行计数时,我们就赋予了时间以一个个单位间隔、进而赋予时间以相应的数值。显然我们可以使用不同的计时单位(如秒、分、时等单位)对时间进行测量,而这样做完全不会影响到对时间的描述,只不过采用不同的计时单位对时间进行测量,测得的时间的**测量值**是不同的,但时间本身并不会因此发生任何改变(对此,图 1-8 足以说明问题)。我们还是用上面列举过的例子,比如我们可以用"小时"作计时单位对一天这一时间间隔进行测量,这样,对"一天"这一时间间隔的**测量值**就是 24(小时);同样我们也可以用"分钟"作计时单位对"一天"这一时间间隔进行测量,这样对"一天"这一时间间隔的**测量值**就是 1440(分钟)。在此,"一天"这一时间间隔的**测量值**虽然因为我们使用了不同的计数单位而改变了,但该时间间隔本身并不会因为采用不同的计时单位进行测量而发生任何改变。可见在此进行的测量虽然使用了不同的计时单位,但由于均是对同一时间间隔的测量,所以不可能导致该时间间隔发生任何改变。

由此可见,所谓的"时间变慢"或"时间膨胀"现象是根本不存在的,因此相应的结论也是完全错误的。也许在相对论中正是由于无法证明时间本身的相对性,从而为了贯彻其相对性观念爱因斯坦否定了时间本身的概念而用具有相对性的时间的测量值来代替。由此我们得到一个重要结论:

【结论三】 由于 K 系与 K' 系之间速度为 V 的相对运动导致相对于 K 系中的观察者而言 K' 系所在的三维空间中任意两点之间的距离按比例 $1:\sqrt{1-V^2/C^2}$ 发生了膨胀,因此相对于 K 系中的观察者而言 K' 系中的时钟的钟摆(或振子单元)运动的路径也以同样的比例增加,从而相对于 K 系中的观察者而言 K' 系中的时钟的钟摆(或振子单元)完成相应路径的变化所需要的时间间隔也以同样的比例增加进而导致时钟的频率减小、时钟变慢而非时间膨胀,时钟变慢现象由公式(1.3a)描述。公式(1.3a)描述的时钟变慢现象与"时间膨胀"或"时间变慢"无关,更确切地说时钟变慢现象完全不同于"时间变慢"现象。

结合上述分析,可以得到以下关于时钟相对变慢现象的正确理解方式:对于两

个存在相对运动的惯性参照系 K 系及 K' 系，两参照系之间的相对运动速度为 V。则不论对于 K 系中的观察者还是 K' 系中的观察者，K 系中的时间及 K' 系中的时间都没有发生膨胀(即 K' 系中的时间以及 K 系中的时间都以同样快的"速度""流逝")，只是因为 K' 系中的三维空间相对于 K 系中的观察者发生了膨胀，从而 K' 系中的所有物质完成其变化过程所需要的时间相对于 K 系中的观察者而言都协同地增大到与 K 系中所有完全相同的变化过程所需要的时间的 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ 倍，因此相对于 K 系中的观察者，K' 系中的所有的物质的变化过程都按 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ 的倍数减慢了，特别是当两参照系之间的相对运动速度达到光速 C 时，在 K 系中的观察者看来，K' 系中的所有物质完成其变化过程所需要的时间都将是无穷大的，从而相对于 K 系中的观察者，K' 系中的所有物质的变化过程都将静止不动；由于相对于 K 系中的观察者而言 K' 系中所有的这些物质变化过程(包括所有时钟钟摆的摆动)的时间性的增减都是协同进行的(即具有协变性)，更确切地说是按相同的倍数进行增减的，因此当 K' 系中的观察者用时钟测量 K' 系中所有物质的变化过程，确切地说 K' 系中的观察者用 K' 系中变慢(或膨胀)了的时钟测量 K' 系中变慢(或膨胀)了相同比例的物质变化过程的时间性时，因为两种效应抵消了，因此在 K' 系中的观察者看来这些变化过程完全像正常情况一样既没有变快，也没有变慢。这种理解方式与光速不变原理及狭义相对性原理完全相容，也与狭义相对论中的所有内容完全相容。可见，时钟相对变慢现象完全由空间的相对膨胀效应所导致而根本不需要"时间变慢"或"时间膨胀"概念来诠释，同时，时钟相对变慢现象也不可能导致(从而也不可能推导出)"时间变慢"或"时间膨胀"现象，充其量只能导致时间的测量值的"膨胀"。而由于狭义相对论中的闵科夫斯基四维时—空中的时间维度是用时钟的测量值构建的，因此闵科夫斯基四维时—空只具有方法论意义而无本体论意义，从而狭义相对论中真实的时—空结构应该是"一维线性时间＋三维闵科夫斯基空间"(这里暂且沿用一维时间的概念，下面的讨论中将引进零维时间概念)。

1.2.4　更一般的结论及实验验证

根据狭义相对性原理，【结论一】可以作进一步的推广。由公式(1.3)及(1.4)可知，对于 K 系中的观察者而言，由于 K' 系中的光脉冲的运动路程增加了，故光脉冲完成相应路程的变化过程需要的时间间隔也增加了。由于这里是某一参照系中的观察者所观察到的在不同的惯性参考系中进行的同一个实验，这也就是说光脉冲从一个位置到另一个位置的变化的运动路径的长度具有相对性，从而完成这一变化过程所需要的时间间隔也具有相对性，其相对性可由公式(1.4)及(1.3)进

行描述。根据狭义相对性原理,由于任何力学和电磁学实验(甚至更复杂的化学变化及生物变化实验)都无法区分静止的和匀速运动的惯性参考系,物理定律在任何惯性参考系中都具有相同的数学形式,由此可以得到一个涵盖化学变化及生物变化等更复杂的变化形式的、比【结论一】更具有普遍意义的结论。

【结论四】在有相对运动的两个(或几个)参照系中,由于物质完成某一确定的变化过程所经历的"变化路径"具有相对性,从而物质完成该同一变化过程所需要的时间间隔(而不是时间本身)也具有相对性,其相对性分别由公式(1.4)及(1.3)进行描述。

该结论中涉及的一般意义的变化过程的"变化路径"的概念是物体运动过程的"运动路径"(或运动轨迹)的概念在狭义相对性原理基础上的进一步推广。所谓物质的"变化路径"可以定义为把从物质的相对变化过程的开始到结束之间的任一时刻的状态按出现的顺序依次连接起来,这种连线就构成该相对变化过程的变化路径。具体的,由于一切物质都是由原子、分子或更小的物质单元构成的,构成宏观物体的各层次的物质单元处于永恒的运动中,而物质的状态的变化与构成物质的每一个物质单元的空间位置密切相关,这样,对于物质的任意一个状态,构成该物质的任意一个特定的物质单元在三维空间中都有一个确定的位置与之对应,把该物质的整个相对变化过程的任一时刻的状态所对应的一个特定的物质单元的空间位置按物质的状态发生的顺序依次连接起来,就构成该物质相对变化过程的变化路径。显然,物质的变化路径是一条极其复杂的曲线。

由此可以推论出:由于光速相对于任何参照系都是恒定的,当物质从一个状态到另一个状态的变化所经历的"变化路径"按一定比例相对增加时,物质完成其变化过程所需要的时间间隔也必定会按相同比例相对增加。可见,相对于静止的参照系,运动参照系中的时钟的走时之所以变慢,完全是由于相对于静止的参照系而言构成时钟钟摆(或振子)单元的分子或原子运动路径按一定比例增大(或膨胀),而导致构成时钟钟摆(或振子)的分子或原子完成相应的变化过程所需要的时间也按同一比例增大而完全不是"时间膨胀"或"时间变慢"的缘故。相对于静止参照系而言,由于运动参照系中构成时钟钟摆(或振子)单元的分子或原子完成时钟钟摆(或振子)单元的一个摆动(或振动)周期的变化所经历的变化路径增加,所以构成时钟钟摆(或振子)单元的分子或原子要完成一个摆动(或振动)周期所需花费的时间间隔自然增加了,从而时钟钟摆(或振子)单元的摆动(或振动)周期增大了,摆动(或振动)频率自然减小了,在静止参照系的观察者看来时钟钟摆(或振子)的摆动频率确实变慢了;特别的,当时钟所在的参照系以光速运动时,由于时钟的钟摆(或振子)单元完成一个摆动(或振动)周期的变化所经历的变化路径变为无穷大,这样,时钟的钟摆(或振子)单元要完成一个摆动(或振动)周期所需要的时间间隔也

为无穷大，从而时钟的钟摆（或振子）单元的摆动（或振动）周期为无穷大，摆动（或振动）频率为零，在静止参照系的观察者看来时钟停止摆动（或振动）。显然，时钟的钟摆（或振子）单元要完成一个摆动（或振动）周期所需要的时间间隔变大并不意味“时间变慢”或“时间膨胀”了，时钟的钟摆（或振子）单元要完成一个摆动（或振动）周期所需要的时间间隔为无穷大也不意味时间“停止”了。也就是说，正是由于对所有层次的物质单元具有普适性的运动路径的相对增加，导致了所有物质完成其相对变化过程所经过的变化路径更长，从而物质完成同样的相对变化过程需要的时间也更长。可见，在狭义相对论中时间并非如爱因斯坦所说的具有相对性，而是不同惯性系中的观察者对时间的测量值具有相对性，即时间的相对性完全是测量意义上的而不是本质意义上的，因此，钟表时间不等于时间自身而是测量意义上的时间；当然，不同惯性系中的长度单位也具有相对性，因此观察者对长度的测量值也具有相对性，但与对时间的测量值具有相对性不同的是对长度测量值的相对性完全是由三维空间而非四维时—空的膨胀造成的，因此长度的相对性不仅仅是测量意义上的，从而狭义相对论中所说的四维闵科夫斯基时—空也仅仅是测量意义上的或虚构的而非本体论意义上的四维时—空，自然界中的时—空结构完全不是所谓的四维时—空结构，而是“一维线性时间＋三维的时—空结构”。由于【结论四】是光速不变原理及狭义相对性原理的合理推广，与狭义相对论的全部理论完全一致，从而被大量的科学实验所证实。

在 1941 年，美国芝加哥大学的布鲁诺·罗西（Bruno Rossi）和戴维·霍尔（Pavid Hall）在丹佛和科罗拉多两地进行的高速运动的 μ 介子的衰变实验（科学家通过无数次实验发现一个静止的 μ 介子平均需要大约 2×10^{-6} s 即衰变为一个电子）。而布鲁诺·罗西与戴维·霍尔发现来自宇宙空间高速运动的高能宇宙射线粒子撞击地球高空大气层的空气粒子后会产生大量速度约为 2.994×10^{8} m/s（该速度约是光速的 0.998 倍）的 μ 介子，这些 μ 介子经过近 10km 路程的穿行后到达地球表面并被盖革计数器所检测到。而在 μ 介子的平均寿命内，以 0.998 倍光速的速度穿行的 μ 介子其穿行的距离只能达到 600m，而 μ 介子完成近 10km 的路程的穿行所需要的时间间隔约 31.7×10^{-6} 秒之多（也就是这些 μ 介子的寿命）。现在来看这一现象完全证明了运动的 μ 介子的寿命会延长，较精确地证明了狭义相对论的计算[①]。

现在让我们看另一个实验，1966 年物理学家在日内瓦欧洲原子核研究委员会（CERN，即现在的欧洲原子核研究组织）所在地附近的欧洲粒子加速器实验室中产生出一些 μ 介子，并把这些 μ 介子导入一个环形真空管中，这些 μ 介子在环形真

---

① ［英］保罗·戴维斯. 关于时间——爱因斯坦未完成的革命［M］. 崔存明，译. 长春：吉林人民出版社，2002：56—57.

空管中以光速的0.997倍的速度循环。通过与速度很慢(近似于静止)的μ介子的存在时间(寿命)的比较发现这些在环形真空管中以光速的0.997倍的速度循环的μ介子的存在时间(寿命)是静止的μ介子的存在时间(寿命)的12倍,这一实验以±0.02的相对误差同样证明了狭义相对论的计算[①]。在以上两个实验中由于μ介子相对于实验人员作高速运动,因此其运动路径相对于实验人员发生了相对膨胀,从而μ介子完成相应的路径所需要的时间增大了,因此实验结果显然也与【结论四】完全一致。

运动的时钟变慢的现象在20世纪70年代得到了非常直接的、精确的实验证实。1971年10月,圣路易斯华盛顿大学的J. C. 哈夫勒(J. C. Hafele)以及理查德·基廷(Richard Keating)利用四台铯原子钟进行了运动的时钟变慢的相关的实验。J. C. 哈夫勒和理查德·基廷把这四台原子钟安装在商用飞机上,飞机以光速百万分之一的速度先是向东,然后向西飞行。影响虽然十分微小,但时钟仍然非常精确地记录下了飞机的运动对时钟的影响,原子钟因此每天会产生大约1μs的差异。飞机经过几个小时的飞行最终产生的结果是:飞机在自西向东飞行的过程中伴随飞行的四台原子钟比地面上天文台的标准时钟平均慢了59mμs(约10亿分之一秒),而飞机在自东向西飞行的过程中伴随飞行的四台原子钟比地面上天文台的标准时钟平均慢了273mμs(约10亿分之五秒)。飞机向东及向西飞行导致时钟变慢的程度不同的原因是地球自西向东绕地轴旋转,扣除地球的自转对时钟变慢的影响(另外由于地球的引力场对时钟的影响非常小,在这种实验中可以忽略不计),飞机的飞行对时钟的变慢造成的影响在铯原子钟的误差范围内精确地证实了狭义相对论的计算[②],显然也与【结论四】完全一致。

2011年2月,美国标准技术研究院(NIST)的科学家制造出铝离子原子钟,该原子钟37亿年的误差不超过1秒。借助铝离子原子钟,美国标准技术研究院的科学家验证了铝离子原子钟以10m/s的速度运动的情况下原子钟的走时所发生的变化。相关论文刊登在美国《科学》杂志上。实验中NIST的科学家使用了两只铝离子原子钟,实验前对原子钟进行调试以使两台原子钟的走时完全一样。然后,NIST的科学家对其中一只铝离子原子钟施加不断变化的电磁场,使构成原子钟的铝离子以10m/s的速度发生快速往复运动,而另一个原子钟的铝离子则保持静止。结果显示,对其施加不断变化的电磁场的铝离子原子钟的走时比静止的铝离子原子钟的走时略微缓慢了一些。该实验在相对运动速度很低的情况下较精确地证实了狭义相对论的计算[③],显然也与【结论四】完全一致。

---

① [英]保罗·戴维斯.关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M].崔存明,译.长春:吉林人民出版社,2002:60.
② [英]保罗·戴维斯.关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M].崔存明,译.长春:吉林人民出版社,2002:59.
③ 科学家造有史以来最精确钟 验证时空扭曲理论[EB/OL].[2010—10—10]http://www.sina.com.cn.

我们可以发现,上面列举的所有实验证明的都是与物质完成其变化过程需要的时间的相对增大有关的现象,其本质都是相对于静止参照系中的观察者而言运动参照系中空间的膨胀所导致的物质完成其变化过程所需要经历的路径增大从而完成整个变化过程所需要的时间相对增大。这些实验根本没有也不可能证明所谓的时间膨胀现象,实际上关于时间膨胀的观点完全是对【结论四】的错误的理解、诠释的结果,实际上,【结论四】每天都被科学家们所进行的关于微观粒子的各种试验所证实。

1.2.5 在引力场中物质的存在及完成其确定的变化过程所需时间具有相对性

上述【结论四】是在对惯性系中的物质的变化过程的研究中得出的,而通过下面的讨论,可以发现这一结论完全可以推广到非惯性系特别是引力场的情况。在讨论之前先提出重要的弱等效原理及强等效原理。

弱等效原理:处于引力场中的物体其引力质量与其惯性质量在任何条件下都完全相等。

强等效原理:在引力场中的每一时空点及其无穷小邻域都可以引入一个自由降落系,在其中消除了引力场成为"局域惯性系",狭义相对论的所有结论在其中都成立。

根据弱等效原理可得到以下结论:①只要物体有惯性质量就必定具有引力质量;②在引力场中由加速运动产生的效果和由引力产生的效果可以严格抵消。下面我们用等效原理来分析【理想实验3】。

【理想实验3】我们把上述理想实验中用到的实验装置放置在地球的(空间结构不随时间变化的、恒定的)引力场中进行研究。假定一个实验箱 K'(K'系)在地球的均匀引力场中作自由落体运动,观察者 X′与实验箱相对静止,光脉冲发射—接收器 P′及平面镜 J′固定在实验箱中的一个台面上,并且 P′到 J′的垂线与实验箱的自由下落的方向垂直,P′到 J′的垂直距离非常微小(令其为 $\mathrm{d}x$),以至于在光脉冲所发生的位移空间范围中引力场强度基本不变,另外假定光脉冲在这样微小的空间范围内其衍射效应忽略不计。一束光脉冲相对于观察者 X′从光脉冲发射—接收器 P′垂直射向平面镜 J′再由 J′反射回 P′(并被 P′接收),显然,实验箱已经不是惯性参照系。观察者 X 为与地球相距足够远处且与地球处于相对静止的惯性系 K(K 系)中的观察者,另外一只与上述(试验箱中)结构及配置完全相同的试验箱放置在 K 系中。由于光脉冲具有能量,则由质能公式可知光脉冲具有惯性质量,根据弱等效原理可知光脉冲同样具有与其惯性质量完全相等的引力质量,这样,在引力场中的任一点上光脉冲与实验箱及其中的整个实验装置具有完全相同的向下的加速度 a,整个装置完全等效于一个惯性系。则观察者 X′观察到的情况

是：一束光脉冲从光脉冲发射—接收器P′垂直射向平面镜J′再被J′反射回P′，光脉冲从光脉冲发射—接收器P′到平面镜J′再被J′反射回P′的位移是$2\mathrm{d}x$，如图1-11所示。

显然，观察者X观察到的放置在K系中的试验箱中所发生的现象及据此获得的结论与观察者X′观察到的放置在引力场中的试验箱中所发生的现象及据此获得的结论完全相同。另一方面，由于实验箱K'连同整个实验装置处于地球的引力场中并向地心方向作加速度为a的加速运动，由于K系与K'系之间存在相对的加速度运动，K系中的观察者观察到的K'系中进行的实验的具体情况与图1-11中发生的情况完全不同。即在K系中的观察者看来，光脉冲所经历的路径已经不是图1-11中所发生的情况：一束光脉冲从光脉冲发射—接收器P′垂直射向平面镜J′再被J′反射回P′，光脉冲从光脉冲发射—接收器P′到平面镜J′再被J′反射回P′，该观察者X观察到的实际情况如图1-12所示：由于整个实验装置在地球的引力场中作加速度为a的匀加速运动，当光脉冲离开光脉冲发射—接收器P′射向平面镜J′的过程中平面镜J′已经不在原先的位置上，而是随实验箱向下移动到如图1-12中的②所示的位置；当光脉冲赶上平面镜J′并被平面镜J′反射回来时光脉冲发射—接收器P′也不在原先的位置上，而是随实验箱向下移动到如图1-12中的③所示的位置，这样观察者X观察到的光脉冲从光脉冲发射—接收器P′射向平面镜J′再由J′反射回P′(并被P′接收)这整个过程所经过的路径实际上是图1-12中的曲线部分$AB'A''$。

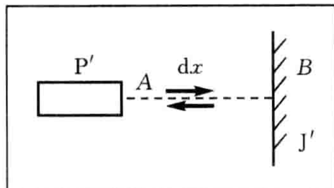


图1-11　相对于实验箱静止的观察者X′测量光脉冲从P—J—P所经历的时间间隔的理想实验

显然，与观察者X′观察到的光脉冲在整个实验过程中所经过的路程为$2\mathrm{d}x$的情况相比，观察者X观察到的实验箱中的光脉冲所经过的路程显然大于$2\mathrm{d}x$；由于上述理想实验是在非惯性系中进行的，因此已经不能通过狭义相对论的简单计算作出结论，而必须借助广义相对论进行分析。下面根据广义相对论就放置在两不同参照系的试验箱中的光脉冲完成其运动过程所需要的时间间隔以及两不同参照系中的观察者分别对某一时间间隔的测量值之间的关系进行简单的讨论。

爱因斯坦在其广义相对论中通过对匀速旋转的圆盘上的时—空特性的数学分析并结合等效原理发现，引力场实际上就是弯曲的“四维时—空”，而且这种弯曲的“四维时—空”可以用四维黎曼时—空来描述，即有：

$$\mathrm{d}S^2 = g_{mn}\mathrm{d}x_m\mathrm{d}x_n \tag{1.5}$$

式中m、n=0、1、2、3，dS是局部惯性系中的四维间隔，g_{mn}是四维黎曼时—空的度

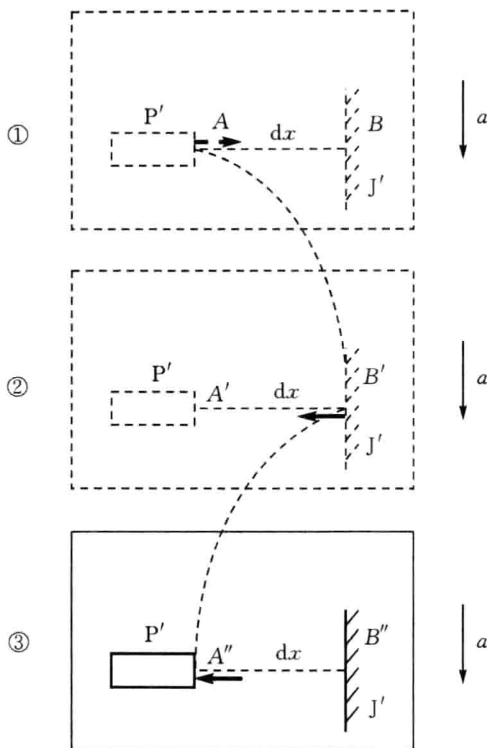


图 1－12 观察者 X 测量光脉冲从 P—J—P 所经历的时间间隔的理想实验

规(它决定空间的一切内禀的度量性质，特别是时空中任意两邻近点之间的距离都由 g_{mn} 决定，而 g_{mn} 又由物质的分布及其运动状态决定，在真实的引力场中的不同点处 g_{mn} 不一定相等，一般情况下 $g_{mn} \neq \pm 1$)，x_m 或 x_n 是四维黎曼时一空的坐标，其中 x_0($x_0 = -Ct$)为引力场中的时间坐标，x_1，x_2，x_3 分别为引力场中的空间坐标。根据强等效原理，在引力场中空间坐标为 $P_0(x_1^0, x_2^0, x_3^0)$ 的确定点上(假定在 P_0 点及其邻近点处的四维黎曼空间的度规近似等于 g_{mn}^0)，我们可以在 P_0 点及其无穷小邻域引入一自由降落系，使其成为局域惯性系，狭义相对论的所有结论(包括光速不变原理)在其中都成立。现在假定光脉冲从空间中的一点 $P_0(x_1^0, x_2^0, x_3^0)$ 运动到与其相邻的另一点 $P_1(x_1^0 + dx_1, x_2^0 + dx_2, x_3^0 + dx_3)$ 后被反射镜反射回 P_0 点，而观察者 X′用 K' 系中放置在空间点 $P_0(x_1^0, x_2^0, x_3^0)$ 处的时钟测得，K' 系中的光脉冲完成相应的变化路径需要的时间间隔为 $2\mathrm{d}t$(这种测量至少在理论上是可行的)，观察者 X 用相对于 K 系静止的时钟测得的 K' 系中的光脉冲完成相应的变化路径需要的时间间隔为 $2\mathrm{d}t'$，显然 $2\mathrm{d}t'$ 完全可以理解为是观察者 X 用相对于 K 系静止的

时钟对K'系中的时钟所测得的，对K'系中的观察者而言测量值为$2\mathrm{d}t$的时间间隔进行测量所得到的时间间隔值。在此，如果直接用公式(1.5)对光脉冲在引力场中的运动过程进行分析并据此计算光脉冲完成相应的变化过程所需要的时间间隔将会使问题异常复杂以至于最终会使得分析无法进行下去，因此改用直接由时钟测量这一时间间隔，即对这一时间间隔不去通过分析而只是通过测量获得，而后对这些用于测量时间间隔的时钟及所测得的时间之间存在的关系进行分析，这样做能够使问题大为简化。这样，对于放置在K'系中的空间点$P_0(x_1^0,x_2^0,x_3^0)$点上的时钟及K系中相对于X静止的时钟而言，K'系中的观察者用空间点$P_0(x_1^0,x_2^0,x_3^0)$上的时钟所测得的该时间间隔为$2\mathrm{d}t$，而K系中的观察者用K系中的时钟所测得的该时间间隔为$2\mathrm{d}t'$，时间间隔$2\mathrm{d}t$与$2\mathrm{d}t'$之间存在的关系可以通过下列方式进行计算。首先，在K系中的观察者使用的时钟测得的这一时间间隔符合关系式：

$$\mathrm{d}x_1^0 = \mathrm{d}x_2^0 = \mathrm{d}x_3^0 = 0$$

所以

$$\begin{aligned}\mathrm{d}S^2 &= g_{mn}^0 \mathrm{d}x_m^0 \mathrm{d}x_n^0 \\ &= g_{00}^0 \mathrm{d}x_0^0 \mathrm{d}x_0^0 \\ &= g_{00}^0 C^2 (2\mathrm{d}t')^2\end{aligned}$$

另外，K'系中的观察者使用的时钟测得的这一时间间隔符合关系式：

$$\mathrm{d}S^2 = -C^2(2\mathrm{d}t)^2$$

所以有

$$g_{00}^0 C^2 \mathrm{d}t'^2 = -C^2(2\mathrm{d}t)^2$$

即

$$\mathrm{d}t' = \frac{\mathrm{d}t}{\sqrt{-g_{00}^0}} \quad \mathrm{s}(K) \tag{1.6}$$

由于在P_0点及其无穷小邻域光速不变原理成立，从而观察者X′用放置在空间点$P_0(x_1^0,x_2^0,x_3^0)$处的时钟测得的光脉冲从空间中的点$P_0(x_1^0,x_2^0,x_3^0)$运动到与其相邻的另一点$P_1(x_1^0+\mathrm{d}x_1,x_2^0+\mathrm{d}x_2,x_3^0+\mathrm{d}x_3)$后再返回$P_0$的路程为$\mathrm{d}S=2C\mathrm{d}t$，观察者X用相对于$K$静止的时钟测得的光脉冲从空间中的点$P_0(x_1^0,x_2^0,x_3^0)$运动到与其相邻的另一点$P_1(x_1^0+\mathrm{d}x_1,x_2^0+\mathrm{d}x_2,x_3^0+\mathrm{d}x_3)$后再返回$P_0$的路程为$\mathrm{d}S'=2C\mathrm{d}t'$，所以有：

$$\mathrm{d}S = 2C\mathrm{d}t = 2C\sqrt{-g_{00}^0}\,\mathrm{d}t' = \sqrt{-g_{00}^0}\,\mathrm{d}S'$$

即

$$\mathrm{d}S' = \frac{\mathrm{d}S}{\sqrt{-g_{00}^0}} \quad \mathrm{m}(K) \tag{1.7}$$

显然公式(1.6)与公式(1.3)的形式及意义完全相同，公式(1.7)与公式(1.4)的形式及意义也完全相同，并且由公式(1.6)及(1.7)可得关系式：

$$\mathrm{d}t' : \mathrm{d}t = \mathrm{d}S' : \mathrm{d}S = \frac{1}{\sqrt{g_{00}^0}}$$

即$\mathrm{d}t'$的值相对于$\mathrm{d}t$值的增大总是与$\mathrm{d}S'$的值相对于$\mathrm{d}S$值的增大相伴随。由此可

见，我们这里获得的结论与狭义相对论中类似的情况完全相同，即相对于惯性系中的观察者而言，由于物体的质量导致其所在空间发生弯曲，从而与惯性系所在平直空间中的任何一个点与其微小邻域中的另一个点之间的距离相比，弯曲空间中的任何一点与其微小邻域中的另一个点之间的短程线均按比例 $1:\sqrt{g_{00}^{0}}$（$\sqrt{g_{00}^{0}}$是空间在该点上的度规）发生了膨胀，而由于在任何一点及其微小邻域中光脉冲都以恒定的速度（即光速 C）运动，从而在弯曲空间中光脉冲完成与惯性系中完全相同的确定的微小变化过程所需要的时间也按相同的比例增大了。因此，相对于惯性系中的观察者而言，放置在弯曲空间中该点上的时钟的频率也按相同的比例变慢了，从而惯性系中的观察者用时钟测得的放置在弯曲空间中某一点上的时钟钟摆的一个摆动周期为$\frac{1}{\sqrt{g_{00}^{0}}}$ s。而对于 K'系中的光脉冲完成相应的变化需要的时间间隔 $\mathrm{d}t$，K'系中的观察者用放置在空间点 $P_0(x_1^0,x_2^0,x_3^0)$处的时钟测得的时间间隔是 $\mathrm{d}t$，K 系中的观察者用相对于 K 系静止的时钟测得的时间间隔是 $\mathrm{d}t'$，由上述讨论可知，这两个参照系中的观察者测得的时间间隔的**测量值**是不同的，也即不同参照系中的观察者对弯曲空间中的某一确定的、物质所完成的变化过程需要的时间间隔的测量值具有相对性。与狭义相对论中的情况类似，K'系中的观察者与 K 系中的观察者对同一时间间隔进行的测量所测得的**测量值**不同的原因是相对于 K 系中的观察者，K'系中的时钟的计时单位发生了变化，或者更确切地说是 K'系中的时钟的频率变小，从而时钟变慢的缘故，由下面的分析可知，其根本原因则是引力场强度越强之处光脉冲从空间的一点上运动到与其相邻近的下一点上所经历的路径越长。

假定在引力场中完全不同的两个点 $U(x_1{}^u,x_2{}^u,x_3{}^u)$、$V(x_1{}^v,x_2{}^v,x_3{}^v)$上的度规分别为 $g_{00}(U)$及 $g_{00}(V)$，观察者 X′用放置在空间点 $U(x_1{}^u,x_2{}^u,x_3{}^u)$上的时钟测得的光脉冲从空间中的点 $U(x_1{}^u,x_2{}^u,x_3{}^u)$运动到与其相邻的另一点 $U_1(x_1{}^u+\mathrm{d}x_1,x_2{}^u+\mathrm{d}x_2,x_3{}^u+\mathrm{d}x_3)$所需要的时间间隔为 $\mathrm{d}t$，所经历的路程为 $\mathrm{d}S=C\mathrm{d}t$；而观察者 X 用相对于 K 系静止的时钟测得的该过程所需要的时间间隔为 $\mathrm{d}t'(U)$，所经历的路程为 $\mathrm{d}S'(U)=C\mathrm{d}t'(U)$。观察者 X′用放置在空间点 $V(x_1{}^v,x_2{}^v,x_3{}^v)$上的时钟测得的光脉冲从空间中的点 $V(x_1{}^v,x_2{}^v,x_3{}^v)$运动到与其相邻的另一点 $V_1(x_1{}^v+\mathrm{d}x_1,x_2{}^v+\mathrm{d}x_2,x_3{}^v+\mathrm{d}x_3)$所需要的时间间隔同样为 $\mathrm{d}t$，所经历的路程为 $\mathrm{d}S=C\mathrm{d}t$；而观察者 X 用相对于 K 系静止的时钟测得的该过程所需要的时间间隔为 $\mathrm{d}t'(V)$，所经历的路程为 $\mathrm{d}S'(V)=C\mathrm{d}t'(V)$。由公式(1.6)可知，在观察者 X 用相对于 K 系静止的时钟测得的光脉冲分别从这两点上运动到分别与这两点邻近的下一点上所需要的时间间隔之比为：

$$dt'(U):dt'(V)=\frac{dt}{\sqrt{-g_{00}(U)}}:\frac{dt}{\sqrt{-g_{00}(V)}}=\sqrt{\frac{g_{00}(V)}{g_{00}(U)}}$$

则
$$dt'(U)=\sqrt{\frac{g_{00}(V)}{g_{00}(U)}}dt'(V)=\frac{dt'(V)}{\sqrt{\frac{g_{00}(U)}{g_{00}(V)}}}\quad s(K) \tag{1.8}$$

即引力场强度越强之处光脉冲从空间的一点上运动到与其相邻近的下一点上所需要的时间间隔就越长。由公式(1.7)可知，在观察者 X 用相对于 K 系静止的时钟测得的光脉冲分别从这两点上运动到分别与这两点邻近的下一点上所经历的路径之比为：

$$dS'(U):dS'(V)=\frac{dS}{\sqrt{-g_{00}(U)}}:\frac{dS}{\sqrt{-g_{00}(V)}}=\sqrt{\frac{g_{00}(V)}{g_{00}(U)}}$$

则
$$dS'(U)=\sqrt{\frac{g_{00}(V)}{g_{00}(U)}}dS'(V)=\frac{dS'(V)}{\sqrt{\frac{g_{00}(U)}{g_{00}(V)}}}\ m(K) \tag{1.9}$$

我们知道，一般情况的爱因斯坦引力场方程是难以求解的，只有在特定条件下才能求出其严格的解，其中施瓦西(即球对称)解就是最重要的一类解。而对于物质的质量以呈球对称形式分布(如地球、太阳等，其引力场为球对称引力场)的情况，借助爱因斯坦的引力场方程：

$$R_{mn}-1/2g_{mn}R=\kappa T_{mn}$$

可以严格地求出与之对应的四维黎曼时—空的度规张量 g_{mn}，即爱因斯坦引力场方程关于球对称引力场的施瓦西解。其中 R_{mn} 是二阶曲率张量，R 是零阶曲率张量(标量曲率)，均为 g_{mn} 的函数。T_{mn} 是能量—动量张量，由物质的分布及其运动状态唯一决定，κ 是常数。下面是德国数学家施瓦兹西尔德求得的爱因斯坦场方程的球对称解即间隔 dS^2 的施瓦西度规的数学表达式：

$$dS^2=-(1-2m/r)(d\tau)^2+[1/(1-2m/r)]dr^2+r^2d\theta^2+r^2\sin^2\theta d\varphi^2$$

其中 $m=GM/C^2$，G 是万有引力常数，$\tau=Ct$，m 是产生引力场的质量，r 是球对称引力场的径向参数。由四维间隔 dS^2 可以得到关系：

$$g_{00}=-(1-2m/r)$$

这样，公式(1.6)可以写成

$$dt'=\frac{dt}{\sqrt{-g_{00}^{0}}}=\frac{dt}{\sqrt{(1-2m/r)}}\ s(K) \tag{1.6a}$$

公式(1.7)可以写成

$$dS'=\frac{dS}{\sqrt{-g_{00}^{0}}}=\frac{dS}{\sqrt{(1-2m/r)}}\ m(K) \tag{1.7a}$$

公式(1.8)可以写成

$$dt'(r_u)=\frac{dt'(r_v)}{\sqrt{\dfrac{(1-2m/r_u)}{(1-2m/r_v)}}}\quad s(K) \tag{1.8a}$$

从式(1.6a)及(1.7a)可见，相对于惯性系中的观察者而言，处于球对称分布的质量产生的引力场中试验箱的光脉冲完成其微小运动过程所需要的时间(而非时间本身)按比例 $1/\sqrt{(1-2m/r)}$ 相对增大完全是由于光脉冲因空间的相对弯曲导致所经历的微小路径按相同的比例相对增大造成的，这也就意味着比例 $1/\sqrt{(1-2m/r)}$ 必定是由于空间的弯曲导致的路径相对增大的反映。我们知道，采用球面坐标的四维欧几里得空间的度规与施瓦西度规之间仅仅在 g_{00} 与 g_{11} 有区别，也就是说施瓦西度规中只有 g_{00} 与 g_{11}(确切地说只有 g_{11})反映着该度规所描述的空间的弯曲。而在施瓦西度规中 $g_{11}=1/(1-2m/r)=-1/g_{00}$，即在施瓦西度规中 g_{00} 由 g_{11} 所决定，从而比例 $1/\sqrt{(1-2m/r)}$ 必定是由于空间的弯曲导致的路径相对增大的反映，因此，光脉冲完成其确定的变化过程所需要的时间相对增大的根本原因就是空间的相对弯曲导致的空间中任意两邻近点之间测地线的相对膨胀。结合我们前面在惯性系中所进行的理想实验的相关结论以及强等效原理，作者认为这一结论必定具有一般性，也就是说物质完成其确定的微小变化过程所需要的时间(而非时间本身)相对变大的根本原因就是由于空间的相对弯曲导致的物质完成其确定的微小变化过程所经历的空间中相邻两点之间的测地线的相对膨胀，由于相应的讨论远超出本书的范围，我们就不在此作进一步的论述。

特别的，如果物质的某一变化过程在 r_u 处附近所需要的时间间隔为 $\Delta t'(r_u)$，物质的该同一变化过程在 r_v 处所需要的时间间隔为 $\Delta t'(r_v)$，则有：

$$\Delta t'(r_u)=\frac{\Delta t'(r_v)}{\sqrt{\dfrac{(1-2m/r_u)}{(1-2m/r_v)}}}\quad s(K) \tag{1.10}$$

假定有两只结构完全相同的时钟，从而这两只时钟放置在空间的同一个点上时它们的周期完全相同。将其中一只时钟放置在 r_u 处，观察者 X 用相对于 K 系静止的时钟测得其周期为 $T(r_u)$，另一只时钟放置在 r_v 处，观察者 X 用相对于 K 系静止的时钟测得其周期为 $T(r_v)$，则有：

$$T(r_u)=\frac{T(r_v)}{\sqrt{\dfrac{(1-2m/r_u)}{(1-2m/r_v)}}}\ s(K) \tag{1.10a}$$

公式(1.9)可以写成

$$dS'(r_u) = \frac{dS'(r_v)}{\sqrt{\dfrac{(1-2m/r_u)}{(1-2m/r_v)}}} \text{m}(K) \tag{1.9a}$$

特别的，如果物质的某一变化过程在 r_u处附近所经历的变化路径为 $\Delta S'(r_u)$，物质的该同一变化过程在 r_v处所经历的变化路径为 $\Delta S'(r_v)$，则有：

$$\Delta S'(r_u) = \frac{\Delta S'(r_v)}{\sqrt{\dfrac{(1-2m/r_u)}{(1-2m/r_v)}}} \text{m}(K) \tag{1.11}$$

显然，公式(1.10)与公式(1.3)的形式及意义完全相同，公式(1.11)与公式(1.4)的形式及意义也完全相同，并且由公式(1.10)及(1.11)可得 $\Delta S'(r_u):\Delta S'(r_v)=\Delta t'(r_u):\Delta t'(r_v)$，即 $\Delta t'(r_u)$的值相对于 $\Delta t'(r_v)$值的增大总是与 $\Delta S'(r_u)$的值相对于 $\Delta S'(r_v)$值的增大相伴随，可见，这里获得的结论与前面对惯性系进行讨论所获得的结论完全相同。另外，对于物质的同样的变化过程，假定 $r_u<r_v$，即 r_u之处的引力场强度较 r_v之处的引力场强度强，则 $1/r_u>1/r_v$，$2m/r_u>2m/r_v$，$-2m/r_u<-2m/r_v$，$1-2m/r_u<1-2m/r_v$，假定 $1-2m/r_u>0$，则显然有$\sqrt{\dfrac{(1-2m/r_u)}{(1-2m/r_v)}}<1$，因此 $\Delta S'(r_u)>\Delta S'(r_v)$，即引力场强度较弱之处的观察者 $X(r_v)$观测到引力场强度较强之处的某一物质变化过程所经历的变化路径 $\Delta S'(r_u)$，较引力场强度较弱之处的同一物质变化过程所经历的变化路径 $\Delta S'(r_v)$按一定的比例膨胀了，从而引力场强度较弱之处的观察者 $X(r_v)$观测到引力场强度较强之处的物质完成同一变化过程所需要的时间间隔较引力场强度较弱之处按相同的比例增大了，即 $\Delta t'(r_u)>\Delta t'(r_v)$；特别的，在引力场强度较弱之处的观察者 $X(r_v)$观测到引力场强度较强之处的时钟的周期较引力场强度较弱之处的时钟周期如公式(1.10a)所描述的按一定比例增大了，这就是放置在引力场中的时钟所表现出的“时钟变慢”现象，这里的系数 $1/\sqrt{\dfrac{(1-2m/r_u)}{(1-2m/r_v)}}$就是球对称引力场中与引力场中心相距 r_u的某一空间点周围微小邻域内路径(或空间)的相对膨胀(或弯曲)系数。

其实，由于相对于观察者 X 而言实验箱与其中的物质所处的空间是黎曼空间，所以物质在这种空间中从一点运动到另一点所经过的路径也不是直线，而是弯曲的测地线。而由于两点之间的连线直线段最短，所以与平直的闵可夫斯基空间中的情况相比较显然在黎曼空间中物质从一点运动到另一点所经过的路径明显增大了，也即 $dS'>dS$。把公式(1.9a)与公式(1.4)相比较可知，公式(1.9a)中的相对路径膨胀系数 $1/\sqrt{\dfrac{(1-2m/r_u)}{(1-2m/r_v)}}$ 与公式(1.4)中的相对路径膨胀系数

$\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$的数学形式及意义基本相同，只不过前者适用于引力场而后者则用于匀速运动的情况。由【结论一】可知，公式(1.4)及(1.3)是指相对于 K 系中的观察者而言，因为较 K 系中一切物质的存在及变化过程而言，K'系中的物质的同一变化过程的变化路径按膨胀系数$\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$发生了相对膨胀，因此物质的存在及完成其变化过程所需要的时间间隔也按相同的因子相对增大了。与狭义相对论中因为相对运动而导致的动系中的物质完成变化过程所经历的路径，相对于静系中的观察者按膨胀系数$\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$相对膨胀从而物质完成其变化过程所需要的时间也按相同的比例相对增大的情况完全类似，在公式(1.9a)中由于引力场中空间的相对弯曲，引力场强度较弱的 r_v 处的观察者观察到引力场强度较强的 r_u 附近的微小范围内，发生的任一物质变化过程所经历的变化路径(为测地线)的长度，较引力场强度较弱的 r_v 处发生的同一物质变化过程所经历的变化路径(为测地线)按系数 $1/\sqrt{\frac{(1-2m/r_u)}{(1-2m/r_v)}}$ 相对膨胀了。由于光速在真空空间中某一点的无限小邻域内的速度是光速 C，从而引力场强度较强之处的物质完成某一变化过程所需要的时间间隔，较引力场强度较弱之处的物质完成同一变化过程所需要的时间间隔，按相同的比例增大了，也就是说引力场强度较强之处的物质完成某一变化过程所需要的时间间隔，较引力场强度较弱之处的物质完成同一变化过程所需要的时间间隔增大的唯一原因是：引力场强度较强之处的空间点附近空间弯曲的曲率，较引力场强度较弱之处的空间点附近空间弯曲的曲率大，而空间曲率较大之处的弯曲空间中任何两点之间的测地线的长度，均较空间曲率较小之处的弯曲空间中任何两点之间的测地线的长度膨胀了，从而必然导致光脉冲完成变化过程所需要的时间相对增加。因此可以将引力场中由于光脉冲完成变化过程所需要时间的相对增加而导致的过程相对变慢(包括时钟变慢)的现象，完全还原(或归结)为因弯曲空间的曲率的相对增大而导致的光脉冲运动路径的相对增加而不是时间的膨胀，从而时钟相对变慢现象完全与由于空间的相对弯曲导致的时钟的钟摆所经历路径的相对膨胀密切相关的协变效应。即引力场→空间相对弯曲→弯曲空间中任意两点之间的测地线(距离)相对增大→物质完成其变化过程需要经历的路径相对增大→物质完成其变化过程所需要的时间间隔(而不是其他任意的时间间隔)相对增大→(在惯性系中的观察者看来)放置在引力场中的时钟钟摆完成一次摆动需要的时间相对增大(即时钟相对变慢)→这种时钟的计时单位相对增大→用这种时钟对某一确定的时间间隔进行测量得到的测量值(而非时间间隔本身)相对减小→时间测量值

的相对膨胀。显然，由于真实的引力场在不同的空间位置上的强度不同，在这些不同的空间位置上放置的结构完全相同的时钟钟摆的摆动周期也不相同，从而这些不同的时钟（对时间进行测量）的计时单位也不相同，这样，用不同的时钟对确定的时间间隔进行测量获得的测量值也不相同，确切地说对确定的时间间隔的测量值是随引力场中空间位置的不同而发生非线性变化的。可见，这里的理想实验归根结底只是证明了弯曲空间的曲率的相对增大以及光脉冲的运动路径的相对增加而不是时间的膨胀。

显然，从公式（1.8a）可见，在离引力场中心较远从而引力场较弱处的观察者看来，距离引力场中心越近从而引力场越强处，物质完成同一变化过程所需要的时间间隔越大；特别是在公式（1.8a）或（1.9a）中，如果令 $r_u=2m$，那么 $dt'(r_u)$（或 $dS'(r_u)$）$\to\infty$，即由于空间极度的弯曲（在这种情况下空间的曲率为无穷大）使得物质完成某一变化过程需要经过无穷大的变化路径，这样物质完成该变化过程所需要的时间间隔也为无穷大，这就是广义相对论中所谓的黑洞效应，在黑洞的“视界”外的观察者看来，“黑洞”的“视界”内一切物质的变化过程都变得无限缓慢乃至变化基本停顿，其内部的时钟同样如此，此即广义相对论中提到的引力场中的钟慢效应。因此相对于惯性系中的观察者而言，放置在引力场中的时钟的计时单位必然发生改变（即计时单位变大），而由于放置在引力场中的时钟变慢的根本原因是空间发生了弯曲，从而通过对放置在惯性系中的时钟与放置在引力场中的时钟之间读数的比较，能够确定空间弯曲的大致情况。与狭义相对论中的情况类似，由于放置在引力场中的时钟的计时单位相对于放置在惯性系中的时钟的计时单位是不同的，因此这两个参照系中的时钟对同一时间间隔进行测量时所获得的**测量值**显然是不同的，但并不意味着这一时间间隔本身因为使用不同的计时单位对其进行测量而发生了变化，显然这里发生变化的仅仅是对时间间隔的**测量值**，也就是说时间间隔的测量值而不是时间间隔本身具有相对性；在相对论中，正是由于物理学家将对时间的测量值完全等同于时间本身，才导致了表观时间与固有时间两种时间概念，并认为只有固有时间才是真实的时间而表观时间则是虚假的、仅具有测量意义的时间，这一点在物理学家对黑洞的分析中最彻底地显现出来，如法国物理学家约翰·皮尔·卢米涅在其著作中所说：“必须小心地认识这些概念。它们并不意味着，在黑洞内时间坐标变得像外部的空间坐标，因而可以逆转时间，违反因果律。时间坐标由于视界而改变了性质，不再表示真实的时间，不论是在黑洞之内或之外都是如此（在黑洞之外它表示的是由无限远处的时钟测量的表观时间）。唯一有物理意义的时间是超奇点自由下落的钟所测量的原时。在黑洞内部原时只依赖于与中心奇点的距离坐标，所后者的减小而增长。这就像黑洞外部的时间总是朝向未

来流逝，唯一的不同是这里的未来是有终极的，就是黑洞中心的奇点[①]。”作者的观点恰恰相反，由于时间的测量值并不等同于时间本身，因此引入“表观时间”与“固有时”这两个概念并且认为只有“固有时”才是真实的时间的观点是多余的、完全没有必要的，而正是由于相对论物理学家将时间的测量值等同于时间本身才导致了这样的结果。实际上，上面所说的“固有时”才是真正的表观时间，而所说的“表观时间”则可以看做就是(但不等同于)时间本身。另外由于在引力场中空间发生了弯曲，因此，相对于惯性系中的观察者而言放置于引力场中的量杆也发生了弯曲，同时，其长度单位也发生了膨胀。显然，与狭义相对论中的情况类似，引力场中在任何需要就时间进行测量的实验中对时钟的放置方式同样没有任何要求，即引力场中的时钟沿任意方向放置而不会对这些时钟的测量结果产生任何影响。**在此需要特别指出的是，相对于惯性系中的观察者而言，引力场中长度单位的相对膨胀完全是由三维空间而非四维时—空的弯曲从而空间中任意两点之间的测地线的增加直接导致的，而放置于引力场中的时钟的计时单位的相对膨胀则是由时钟钟摆(或振子)摆动(或振动)路径的相对增大，而不是由时间的弯曲或膨胀导致的，另外，放置于引力场中的时钟钟摆(或振子)摆动(或振动)路径的相对增大则完全是由三维弯曲空间造成的，因此引力场中的时钟的计时单位的相对膨胀是由三维弯曲空间间接导致的，也就是说在引力场中三维空间的弯曲直接导致了长度单位的相对膨胀，以及间接导致了计时单位的相对膨胀，也即引力场中的三维弯曲空间同时导致了长度单位及计时单位的相对膨胀。**我们这里的观点显然与爱因斯坦的观点完全不同，爱因斯坦认为在引力场中时钟变慢完全是由于时间膨胀或时间弯曲造成的，我们来看爱因斯坦对所谓的引力时间膨胀给出的一个证明，为简化叙述，我们在此省略了原文中的图示。

“拿两个相同的钟，一个放在地板上一个洞的旁边(以后钟将落进这个洞)，另一个用绳子吊在天花板上。地板钟的嘀嗒由地板附近的时间流决定，而天花板钟的嘀嗒由天花板附近的时间流决定。

每嘀嗒一声，天花板的钟就发出一个极短的光脉冲，指向下面地板上的钟。在天花板的钟刚要发射第一个脉冲前，将吊它的绳子剪断，让它自由下落。假如滴嗒声的间隔极短，那么在下一声嘀嗒响起并发射第二个脉冲的时刻，还察觉不到钟的下落，相对于天花板它几乎还处于静止状态(图 a)。这必然意味着，钟仍然与天花板感受着相同的时间流，也就是说，它的两个脉冲间隔还是由天花板的时间流决定的。

当第一个脉冲刚要到达地板时，让地板上的钟落进洞(图 b)。第二个脉冲跟

① [法]约翰·皮尔·卢米涅.黑洞[M].卢炬甫，译.长沙：湖南科学技术出版社，1997：123—124.

着也很快到达了，在两个脉冲间，自由下落的地板钟的运动还不能被察觉，相对于地板它几乎还是静止的，从而仍然跟着地板感受着相同的时间流。

通过这样的方式，爱因斯坦将比较天花板和地板所感受的时间流的问题，转化成为比较两个自由下落的钟(感觉天花板时间的下落的天花板钟与感觉地板时间的下落的地板钟)的嘀嗒速度的问题。然后等效原理又让他可以借助狭义相对论定律来比较两个下落的钟。

天花板上的钟因为比地板上的钟先落，它向下的速度总是比地板钟的大(图b)，也就是说，它在向地板靠拢。这意味着，地板钟将看到天花板钟发出的经历了多普勒频移(卡片2.3)的光脉冲，即它看到的脉冲到达的时间间隔比它自己嘀嗒的时间间隔更短。由于脉冲间的时间是天花板的时间流决定的，而地板钟的嘀嗒是地板的时间流决定的，这就意味着，地板附近的时间流一定比天花板附近的时间流更慢，换句话说，引力必然使时间流发生膨胀[①]。"

以上爱因斯坦在对放置在引力场中的时钟变慢实验的分析过程中显然将时钟变慢现象完全归结为引力场中的时间膨胀或弯曲，即认为实验中所涉及的任何一只时钟的嘀嗒声都由其附近的时间流所决定，而正是由于引力场中时间的弯曲(时间流变慢)导致了放置在引力场中时钟的变慢。在此，爱因斯坦显然将时间看做虽然受物质质量的影响但仍以时—空的形式独立存在的实体却没有给出任何理论上的证明。实际上，在广义相对论中所谓的时间弯曲恰恰是由放置在引力场中时钟的频率变慢公式推论出的，而爱因斯坦反过来又利用时间的弯曲来解释时钟变慢现象，这显然是循环论证，即用原因推论出结果而后再反过来用结果反证原因的存在。而从上面的分析可知，时钟变慢现象完全是并且只能是由于三维空间而非四维时—空的相对弯曲造成的，正是由于三维空间的相对弯曲(g_{mn}变化)导致了空间中任意两点之间距离的相对增大，从而时钟的钟摆摆动所需经历的路径也相对增大了，这样，时钟的钟摆完成其摆动全过程所需要的时间也相对增大了，从而时钟的计时单位也相对增大，使用相对增大了的计时单位对任何确定的时间段进行测量所得到的测量值将相对减小。也就是说，时钟相对变慢现象并非由其附近的时间流所决定，而是由时钟的钟摆所经过的相对增大的路径决定，也即三维空间的相对弯曲是时钟相对变慢的前提(或充分)条件，而且上面的所有分析告诉我们仅仅用三维弯曲空间的概念而不需要时间弯曲或膨胀的概念就可以对时钟变慢现象进行很好的解释，因此时间膨胀或弯曲对解释时钟变慢现象而言完全是多余的、不必要的。实际上爱因斯坦在狭义相对论及广义相对论中对时钟变慢的解释充满了混乱：如在狭义相对论中，爱因斯坦有时将时钟变慢现象归结为同时性的相对性，有

① [美]基普·S·索恩.黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵[M].李泳，译.长沙：湖南科学技术出版社，2000：84.

时又将其归结为时间膨胀；而在广义相对论中则又认为时钟变慢是时间膨胀或时间弯曲的结果。而在上面获得的由于三维空间的相对膨胀或者弯曲导致时钟变慢（而非时间膨胀）的结论本身就是由狭义相对论或广义相对论经过严格的数学推理所得到的结果，这一结论始终贯穿于狭义相对论及广义相对论中，并可以对狭义相对论及广义相对论中存在的时钟变慢现象提供前后一致的解释，这些解释完全是借助理想实验根据光速不变原理、相对性原理以及等效原理等总结出来的，从而可以对时钟变慢现象提供令人满意的系统理解，并且这些解释与狭义相对论及广义相对论的理论体系完全一致。最后，需要强调说明的是在下面第3章将要讨论的关于不显含时间参数的物理理论中可以使我们更加清楚地认识到，正是由于空间的相对膨胀或弯曲才导致了相对论中所揭示的所有与时间有关的现象，因此，在相对论中时间的膨胀或弯曲的概念或观点实际上是完全多余的、不必要。

也就是说与狭义相对论中所说的惯性系中的情况相类似，在引力场中显然也不存在所谓真实的“时间膨胀”或“时间变慢”，更不可能出现所谓真实的“时间弯曲”，即使在黑洞的“视界”内也不存在时间的“流逝”速度无限地缓慢以致完全停顿的情况（由于任何物质的变化过程都具有时间性，都需要时间，从而时间在任何情况下（包括在黑洞中）永远不会“停止”、也无所谓“停止”）。因为在惯性系（或者引力场较弱处的参照系）中的观察者看来，存在于引力场（或者引力场较强处）中的物质完成某一变化过程所需要的时间间隔增加的原因，完全是由于物质所在的空间是相对弯曲（或更加弯曲）的，从而物质完成其变化过程所经历的变化路径较惯性系（或者引力场较弱处的参照系）中的情况而言膨胀了，完全不是因为“时间膨胀”或者“时间弯曲”的缘故，并且这里所说的“时间膨胀”或“时间弯曲”完全是测量意义上的。即由于放置在引力场中的时钟其频率受引力场的影响从而导致用于测量时间的时钟的计时单位因此发生改变，借助这种改变了计时单位的时钟对确定的时间进行测量，使得**测量值**也会产生相应的改变，而由于放置在引力场中的时钟的频率具有相对性，从而使用这种时钟对时间的测量值（而非时间本身）具有相对性，即仅仅是时间的测量值发生了相对膨胀或弯曲（非线性变化）而时间本身则仍然保持其均匀性，在引力场中时间的相对性完全是测量意义上的而不是实在意义上的。当然，由于在引力场中长度单位也具有相对性，因此观察者对长度的测量值也具有相对性，但与对时间的测量值具有相对性不同的是在引力场中对长度测量值的相对性完全是由三维空间的弯曲造成的，因此长度的相对性不仅仅是测量意义上的而且是实在意义上的。可见，在广义相对论中的用于描述引力场的所谓的四维黎曼时一空间隔 $dS^2 = g_{mn} dx_m dx_n$ 的数学结构中时间与弯曲空间，虽然以极其复杂的数学形式相互交织纠缠、难解难分，但我们显然不能据此下结论说在这种所谓的时空结构中的时间会因此获得弯曲的、复杂的实在性结构及相应的意义，因为这种所

谓的四维黎曼时—空并非真实存在着的时—空结构，其中的时间参数所具有的所谓的复杂结构完全是因为物理学家解决问题的需要借助时间的测量值人为构造出来的而非时间本身所具有的，也就是说广义相对论中的四维黎曼时—空只具有方法论的而无本体论（客观实在性）的意义，其本质仍然是一维线性时间加三维黎曼空间而非四维黎曼时—空，而三维黎曼空间本身就蕴涵了时间测量值（而非时间本身）的弯曲，在此，时间的测量值显然不同于时间本身（这一点在下面的讨论中还要反复提到）。显然，我们这里的结论与现象学中时间的观念是一致的，如黄裕生教授在其著作中的论述："……时间也只有作为测量的时间，它才会被理解为一种现成的存在者。因为根据现成的自然过程去领会和计量时间，首先已认定了：所计量的东西（时间的延伸）和计量的尺度（MaBstab，如分、秒、时、期、纪）都必须是现成的和在场的（anwesend），否则，计量就无法进行。因此，时、分、秒这些时间尺度就必须在白天这一现成在场的时间延伸段中现成地在场，才能按这些尺度来计量这一天的时间，从而给今天的时间定期（Datieren）：8 点 30 分是上班时间，12 点时午餐时间……因此，只要时间是计量的时间，时间就必定被理解为一种自在的现成东西[①]。……任何现象从其显现的时机中被抽离出来，也就成为无时机的现成的自在存在，而只有在概念中才有这种现成的自在存在。这也就是说，无时机无机缘的存在本质上只是一种概念性存在[②]。"因此，时间的测量值这种概念性的东西只能存在于人的头脑里和理论体系中，而绝对不可能是一种客观存在着的对象。

但爱因斯坦在其相对论中则显然将时间的测量值这种概念性的东西完全看做具有客观实在性的对象并由此构造出所谓的一维时间将其与三维空间结合起来构成一个绝对统一的整体—四维时空，其中的时间与空间都只不过是这一四维世界的影子。而爱因斯坦之后的一些学者通过对具有这种时空结构的宇宙模型的哲学思考发现，在这样的宇宙中实际并不存在任何物质的变化，如罗嘉昌教授在其著作中转述波普尔等学者的观点："爱因斯坦的场论就不妨形容为巴门尼德的不变的三维宇宙的四维翻版。因为在一定意义上，爱因斯坦的四维封闭宇宙中是不存在变化的，在它的四维轨迹里，每一事物仅仅是存在，变化成为一种表面的变化。"莱辛巴哈也早已指出："这种无时间的宇宙是一个四维巴门尼德式的存在，在其中没有事变，'完整、不动、没有终止……'。"外尔说得最扼要："客观世界单纯的存在，而不发生"，只有在这个世界的某一部分流传下来的意识，才经历着一个在空间中发生、在时间中行进的、一去不复返的过程。这就是历史。也就是说，时间的流逝只是意识的一种属性，在客观世界中是没有其对应物的。爱因斯坦本人也得出这样的结

---

① 黄裕生．时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M]．南京：江苏人民出版社，2012：18．
② 黄裕生．时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M]．南京：江苏人民出版社，2012：4．

论："既然在这种四维结构里不再存在任何客观上代表'现在'的截面……因此，看来比较自然的是认为物理实在是一种四维的存在，而不是迄今为止所认为的是一种三维存在的演化。"爱因斯坦从提出对时间的革命性看法开始，却把时间纳入空间而告终。在四维时空概念的基础上，在相对论物理学家和一些数学家中，形成了与过程哲学时间观相对立的"流形哲学"观点。这种观点认为时间流纯粹是一种幻觉，普遍时间的观念是一种成见"[①]。为了协调狭义及广义相对论理论与物质变化的概念之间的关系，过程哲学家则提出了与"流形哲学"完全不同的"变化是世界的本质"的观点，正如罗嘉昌先生在其著作中所述："被称做'现代赫拉克利特派'的过程哲学家，则认为变化与发展是自然界真正的、固有的部分，坚持认为时间是不可消除的实在世界的本质，甚至认为时间'在本体论上优先于'空间；认为相对论中时间和空间度量的统一，意味着空间的动力学化，而不是空间的时间化。他们认为相对论中的时间变化只是测量单位的变动性，而时间的普遍推移则始终不受影响[②]。"显然，"过程哲学家"并没有提出充分的理由来说服"流形哲学家"，但"流形哲学家"同样也无法完全否定"过程哲学家"所提出的观点，特别是无法忽视一切物质的变化过程的时间性，以及我们日常生活中所感知到的、同时也是科学实验中反复证明了的一切存在着的物质所表现出的、从未来(还未出现)到现在(正在出现)再到过去(已经出现过)这种变化形式，虽然"流形哲学家"认为这些能够反映所谓时间流逝现象的日常的时间信念完全是一种幻觉，但"流形哲学家"的这种观念却从来没有得到科学实验的任何证明，特别是胡塞尔及海德格尔等现象学大师从现象学角度提出的关于时间的一系列观念显然是"流形哲学家"们所不得不面对的问题，而我们这里通过对相对论中的相关概念的深入分析则提出了彻底否定"流形哲学家"所有观念的充足理由。也就是说相对论以所谓的四维时—空这种结构为前提对物质的运动及变化过程进行研究，最终却导致了对物质的运动及变化过程乃至时间的否定，并因此否定了其存在的基础从而否定了自身，这在一定意义上揭示了相对论概念体系的悖论特征。因此可以说时间的测量值并非如爱因斯坦在其相对论中所说的具有客观实在性从而可以与三维弯曲空间共同构成四维时—空，广义相对论中所谓"四维时—空"中弯曲时间完全是测量意义上的、虚构的而不具有本体论意义；特别是物理学家在广义相对论中所预言的黑洞、虫洞等也应该是三维空间而非四维时—空中的一些特殊结构；而广义相对论中所谓的引力波如果真实存在，那也必定只能是三维空间而非四维时—空的波动模式的传播。当然，爱因斯坦将时间的测量值看做是具有客观实在性的对象是有原因的，其中最重要的是关

① 罗嘉昌.从物质实体到关系实在[M].北京:中国人民大学出版社,2012:119.

② 罗嘉昌.从物质实体到关系实在[M].北京:中国人民大学出版社,2012:120.

于物理方程的协变性要求。现在看来，广义相对论中关于所有物理方程应该具有的协变性的要求也仅仅只具有观察或测量的意义，并非这些方程必须具有的形式。但爱因斯坦最初在相对论中提出协变性这一概念时则是对任何一个成熟的物理理论提出的形式上的要求，甚至相当于一条原理。实际上爱因斯坦在其相对论中对物理方程的协变性这一要求完全是受相对性原理的启发而提出的，而正是这一要求使得在广义相对论中引入四维黎曼时一空的结构成为必然，但正是这一在爱因斯坦看来具有原理意义的协变性，却是量子引力理论中许多问题产生的根源，如物理学家戈登・贝洛特和约翰・厄尔曼在他们的文章中所提到的："该领域很多最棘手的技术上和概念上的问题都是广义相对论的广义协变性导致的。特别是，有时人们会宣称量子引力中关于时间本质的大量深刻难题、在经典引力论和量子引力论中围绕'可观测量'概念的深刻分歧、广义相对论中关于时空之存在的本质的深刻问题，都可以追溯到这一本源上来[①]。"特别是被爱因斯坦认为具有深刻意义的协变性在后来却被物理学家克雷奇曼证明没有任何物理内容，对此，物理学家戈登・贝洛特和约翰・厄尔曼也有论述："正如克雷奇曼在 1917 年首次指出的，广义协变原理无论如何都不存在物理内容：它并没有明确给出某一特殊的物理理论，它所表述的不过是我们对构建物理理论的某种风格的约定（弗里德曼 1983，第 44 页）。这些考虑意味着，作为广义相对论的一种技术上重要却毫无物理内容的特征，广义协变性不可能是任何重要的概念性问题或物理问题的根源[②]。"

1.2.6　关于量子引力理论中时间问题的简单讨论

我们知道，将量子力学的原理与广义相对论结合构成的量子引力理论一直是物理学家梦寐以求的理论，特别是这一理论的最终建立甚至有可能彻底改变人类对宇宙的起源以及宇宙中"黑洞"、"虫洞"等最神秘对象的存在及演化等问题的认识，对人类认识及改造自然具有里程碑的意义，从而被物理学家们称做物理学的圣杯。自从广义相对论及量子力学的理论体系分别建立后物理学家们就开始考虑如何将量子力学应用于引力场的情况，但随着相关研究的深入，物理学家发现将量子力学应用于引力场以及引力场中的物质的运动的描述时最终都会导致各种无穷大的结果。此后的很长一段时间里，相对论物理学家们都致力于建构可以避免无穷大结果出现的量子引力理论。经过数十年的努力，物理学家们分别用不同的方法建构了几种相关的理论，而超弦理论与正则量子引力论则是其中最具影响力的两

① [美]克雷格・卡伦德，[美]尼克・赫盖特. 物理学与哲学相遇在普朗克标度[M]. 李红杰，译. 长沙：湖南科学技术出版社，2013：213.

② [美]克雷格・卡伦德，[美]尼克・赫盖特. 物理学与哲学相遇在普朗克标度[M]. 李红杰，译. 长沙：湖南科学技术出版社，2013：213.

种理论,但这两种理论都完全建立在广义相对论的时空结构基础之上。不久前美国加州大学伯克利分校的物理学家 Petr Horava 则从完全不同的角度进行了这方面的尝试,其方法是将原本不可分割的四维黎曼时—空中的时间与空间在一定条件下进行分割,从而建立了时—空结构与相对论有所不同但近似等效的新的引力理论。正如《新科学家》撰文对 Petr Horava 创立其理论的思路及该理论的特点的评论:"Petr Horava 的灵感来源于凝聚态物理研究中发现的一个现象:在单层碳原子构成的石墨烯上,电子的运动有时并不符合洛伦兹对称。所谓洛伦兹对称是相对论的核心观念的性质,要保持光速不变,物体运动就会出现尺缩钟慢的现象。Petr Horava 想到,如果在宇宙中洛伦兹对称也并非处处成立,那又会怎样。于是他割裂开了时空,在爱因斯坦方程中去掉了洛伦兹对称。结果。在新的方程中引力可以被容纳进量子力学中,用携带力的引力子来描述。而且,同之前的量子引力理论——弦论相比,Horava 的新引力理论在数学上要简单得多。Horava 的论文在 2009 年 1 月发表后,在物理学界掀起了一股热潮,许多物理学家开始使用 Horava 引力研究黑洞、暗物质和暗能量等问题。有人提出,按照新理论,可能不需要暗物质就能解释天体的运动了。新理论也有可能解决理论计算的真空能和实际的暗能量之间相差 120 个数量级的问题。当然,现在还很难判断新理论是否正确。只有在实验室无法达到的高能条件下,Horava 引力才会表现出与广义相对论的不同,人们只好寄希望于未来对超大质量黑洞的观测①。"Petr Horava 的理论虽然在一定程度取得了成功,但毫无疑问是存在争议的,主要由于在其理论中对空间与时间进行了有条件的分离,而且 Horava 并未在理论中提出能够将空间与时间分割开来的充分的理由,因此这种理论是不可能完全正确的(但该理论的初步成功至少说明广义相对论并非描述物质在引力场中的运动及变化过程的唯一正确的理论,同时也说明时间与空间之间并非如爱因斯坦所说是完全不可分割的统一在绝对的四维时—空的结构之中),而实际上,我们上面提出的空—时间结构才真正是这些物理学家一直致力于找寻的对象。需要指出的是,虽然量子力学与广义相对论中关于时间的观点是相冲突的,但这并不意味着量子力学与广义相对论不能在任何条件下以任何方式相协调,实际上,超弦理论即是物理学家所进行的这方面的尝试,该理论通过引入所谓的弦(基本粒子概念相对应,超弦理论认为一根弦就是一个粒子)这一概念将广义相对论与量子力学较好地统一了起来。在超弦理论中,弦与基本粒子之间具有深刻的联系,正如物理学家布赖恩·格林在其著作中所作的描述:"一根基本弦的不同振动模式生成了不同的质量与力荷。这是最核心的一点。因为核心,我们再说一遍:依照弦理论,一个基本"粒子"的性质——它的质量

① 韩晶晶.割裂时间空间,统一相对论量子论[EB/OL].[2010-08-11]新科学家 www.guokr.com/artide/2061.

和不同的力荷——是由它内部的弦产生的精确的共振模式决定的。弦与粒子质量的关联是很容易理解的。振动弦的某个模式的能量取决于它的振幅(峰谷的最大相对位移)和波长(相邻两个峰或谷之间的距离)。振幅大的和波长小的,能量较大。……从狭义相对论我们知道,能量和质量像一枚硬币的两面,是同一事物的不同表现:大能量意味着大质量,大质量也就是大能量。那么,依照弦理论,基本粒子的质量决定于它内部弦的振动模式的能量。质量较大的粒子所具有的弦振动较剧烈,质量小的粒子所具有的弦振动较轻柔。因为粒子的质量决定着它的引力性质,于是我们在这里看到,弦的振动模式与粒子的引力作用之间存在着直接的联系。物理学家还发现,在弦振动模式的其他方面与其他力的性质之间,也存在类似的关联,尽管这里涉及的论证多少要抽象一些[①]。"而由于弦具有远超过普朗克长度的尺寸的特点,使得广义相对论与量子力学之间的矛盾在弦理论中被掩盖了,正如布莱尔·格林在其著作中所述:"广义相对论与量子力学之间的整个矛盾出现在普朗克长度以下的空间结构性质。如果宇宙的物质基元不能探测普朗克尺度以下的距离,那么不论这些基元还是它们组成的事物,都不可能受到那可能的灾难性的小尺度量子涨落的影响。……因为弦能在空间中生长,它对小尺度的感觉也有一定极限。它'感觉'不出普朗克距离尺度下的变化,它像我们的手指一样,把引力场的超微观涨落都'抹平'了。虽然残留的涨落还很剧烈,但抹平后的光滑已足以平息广义相对论与量子力学的水火不容[②]。"可见,在超弦理论中四维时—空仍然保持其固有的平滑特性而没有被量子化,从而时间也没有被"泡沫化"并保持其固有的意义,而正是通过这种方式广义相对论与量子力学可以较好地结合在一起,这也就意味着要使得任何物理理论有意义,其前提条件是至少其中的时间概念必须始终保持其有应有的意义。当然,超弦理论虽然在一定意义上解决了量子力学与广义相对论之间的相容性问题,但该理论为解决问题却要引入可能根本不存在的10维时—空的概念,这又导致了问题的极度复杂化;另外,虽然科学家从超弦理论推论出了一些有意义的成果,但同样也导致了许多至少短期内无法解决的问题,因此,超弦理论同样是存在缺陷的,从而不可能是真正能够解决问题的终极理论。

虽然物理学家们经过努力虽然建立了几种量子引力理论,但至今仍然没有一种理论取得真正的成功。我们认为其中一个很重要的原因是由于在广义相对论中爱因斯坦将虚构的、测量意义上的弯曲的时间维度与弯曲的三维空间组合成的所谓的四维弯曲时—空看做一种实在的结构,同时这种结构还被认为会受到处于引力场中的物质的影响,而在量子力学中时间及空间始终被认为是完全不受物质及

---

① [美]S.格林.宇宙的琴弦[M].李泳,译.长沙:湖南科学技术出版社,2002:137—138.

② [美]S.格林.宇宙的琴弦[M].李泳,译.长沙:湖南科学技术出版社,2002:148.

其存在的影响的物质运动及变化的背景、场所，也就是说正是由于广义相对论与量子力学两者具有完全不同的时间及空间结构，才最终导致当物理学家要将广义相对论与量子力学结合时遇到了前所未有的困难，并造成所有计算都成为无穷大的没有任何意义的结果，使得物理学家一直以来企图将引力结合到量子力学中的努力始终无法成功(而其他各种力基本上都陆续被量子力学所整合)，同时导致了人们对时间本质问题理解上的困难。正如英国物理学家保罗·戴维斯在其著作中所说："由于量子物理学的奇异规则(如：测不准关系)被认为统治着万事万物，包含引力场在内，因而，不仅时钟而且时间本身将服从测不准关系。这就把我们带入有关量子引力这一艰涩的主题。当量子物理学被应用到电磁领域，你就会面对光子以及不可思议而又超乎事理之外的各种奇妙现象……就引力场来说，爱因斯坦展示给我们的是：怎样才能把它看做是一个弯曲或非常弯曲的四维时空。因此，当我们把量子物理学应用于万有引力时，空间和时间也具有各种不可思议的量子特性。这相当程度地恶化并加剧了量子物理学中的'时间问题'，许多令人迷惑不解的难题作为议事日程仍然等待着物理学家们去解答①。"

也就是说当物理学家将量子力学的原理用于引力场(即四维弯曲时—空)时，引力场的量子化就即刻导致了时间的"泡沫化"，在这种情况下时间完全失去了其应有的意义，并因此导致了整个理论出现无意义的结果。正如克里斯托夫·伊山和康斯坦丁娜·萨维多在其文章中对量子引力理论所出现的困难的描述："在广义相对论中，标明事件发生的不同时间的可行方法取决于空时的几何坐标，正是从这一事实中得出了量子引力中时间的核心特征。尽管如此，在量子引力理论(它综合了量子理论和广义相对论)中，我们希望这一几何坐标具有上文我们所讨论过的量子特征，即这一几何坐标并没有确定的取值，而只能概率性的确定。但是如果空时的几何坐标没有确定的取值，那么可以想见，引入时间的一系列方法都将无法实现。尤其是，对能够以非零概率出现的所有几何坐标来讲，没有一种选择能够成为一套统一的方法，以标出事件发生的不同时间②。"可见，正是由于量子力学中的海森堡不确定关系导致了量子引力理论中的时间概念出现了严重的问题，如英国物理学家保罗·戴维斯所述："正如其他精确的概念，诸如粒子的位置和运动轨道在传统量子力学中消失一样，时间也消失在量子模糊所喷出的阵阵烟雾中。就像神秘主义者改变自己意识状态一样，量子宇宙学也肯定无疑地废除了时间③。"虽然在量子引力理论中出现了难以解决的问题，但物理学家们一直进行着各方面的努力，如英国物理学家保罗·戴维斯所说："一直殚精竭虑地致力于发掘朦胧埋藏在

① [英]保罗·戴维斯.关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M].崔存明，译.长春：吉林人民出版社，2002：241.
② [英]K.里德伯斯.时间——剑桥年度主题讲座[M].张邵增，译.北京：华夏出版社，2011：18.
③ [英]保罗·戴维斯.关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M].崔存明，译.长春：吉林人民出版社，2002：244.

广义相对论数学理论中的某种'真正的'、'内在的时间'。这些物理学家希望通过对描述四维时空的几何特征量的某种具有创造性的精妙结合，或许能够发现它们拥有用于度量普适时间的那些性质，因此这个普适的时间就可以作为度量物质变化的真正'背景'①。"特别是有物理学家提出在量子引力理论中引入一种独立于广义相对论理论结构之外的普适时间，虽然这种观点并不被物理学家们所看好，并且如克里斯托夫·伊山和康斯坦丁娜·萨维多在其文章中所说："为了重新认识量子引力中的时间问题，人们已经提出了很多不同的途径。一种可能是有一种普适的时间，独立于广义相对论的内部结构之外。在对理论物理学家感兴趣的过程哲学家和神学家中间，这种观点尤为流行。但是，因为它似乎歪曲了广义相对论的精神——如果不是其定律的话，所以在量子引力领域工作的大多数人对它都不以为然②。"

结合上面的详细论述，我们认为，各种量子引力理论中关于时间概念存在的这些矛盾恰恰反证了所谓四维时—空的虚构性，证明了爱因斯坦的广义相对论的时空观确实是成问题的。另外，在后面的讨论中将看到时间并非一种实体性的存在，从而不能对其实施只对存在着的实体及其物理量而言才有意义的所谓的量子化操作。实际上关于引力场的量子化或者弯曲时空的"泡沫化"的设想，仅仅是物理学家为了将广义相对论与量子力学很好地结合起来而引入的一个假设，这一假设自引入以来从来未获得任何物理学实验的支持，在近几年来反倒受到科学观察结果的质疑，如："2009 年 5 月美国宇航局的费米伽玛射线空间望远镜的探测器探测捕捉到了来自 70 亿光年之外的、自伽马射线爆产生出的三种光子，结果发现这些光子几乎同时被观察到(到达的时间相差不到 1ms)。研究人员表示，这些光子几乎同时到达这种现象支持了爱因斯坦有关时空的观点。根据量子理论学家提出的时空泡沫理论，由于伽马射线爆发的光子的波长非常小以至于即使在非常小的'泡沫里'它们应该也能够发生相互作用。如果这种泡沫的确存在，这三个光子在这场史诗般的旅行中应该互相发生作用，在这样的假设前提下，三者同时被费米伽玛射线空间望远镜捕捉到的概率几乎为零。然而，最新的研究结果几乎完全不支持目前构想的泡沫理论，虽然对该理论还算不上是致命的打击③。"显然，广义相对论与量子力学的结合完全不同于狭义相对论与量子力学的结合，因为在狭义相对论与量子力学结合过程中，根本不存在将所谓的时—空量子化的情况从而并不会导致时间的"泡沫化"，时间的原本意义可以在所有相关的逻辑推理中得到贯彻，因此这种

① [英]保罗·戴维斯. 关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M]. 崔存明，译. 长春：吉林人民出版社，2002：242.

② [英]K·里德伯斯. 时间——剑桥年度主题讲座[M]. 张邵增，译. 北京：华夏出版社，2011：18.

③ 严炎，刘星. 爱因斯坦时空本质理论或被证实[EB/OL]. [2013—01—14]凤凰科技 tech. ifeng. com/discovery/detail—2013—01/14/21153582_0. shtml.

结合在时间概念上不存在任何问题。但在量子引力理论中则完全不同，由于在广义相对论中“时间不再被视为背景参量，即被视为固定的背景时空结构的一个方面，甚至在狭义相对论所采用的不太严格的意义上讲亦如此”[①]，确切地说时间是四维时—空结构的组成部分从而包含在被描述的系统“之内”，并且受物质的运动及分布的影响；而在量子力学中，“由于不是由算子表示的，时间不是一个通常意义上的物理量，而是被当做一个像经典物理中那种标志系统演化的背景参量，依赖于时间的薛定谔方程中的参量 t 就是例子”[②]。

也就是说在量子力学中要求时间处于被描述的系统“之外”，从而与物质及其运动无关。因此广义相对论与量子力学对时间参数在描述物质的变化过程中所起作用的看法是矛盾的，这样，两者从理论的结构形式上似乎无法很好地融合。我们认为，问题的关键在于广义相对论只是等效原理表述方式的其中之一，或者说是数学上用于统一处理引力场中的物质变化过程的方法和技巧中的其中一种理论。由于在爱因斯坦的广义相对论中所谓弯曲的时间完全是虚构的、测量意义上的，因此，我们必定可以建构一种与量子力学的时间结构完全一致，从而既可以与量子力学相协调同时又与爱因斯坦的广义相对论完全等效的、关于等效原理的另一种表述方式的引力理论，这种理论毫无疑问地必须而且只能具有一维线性时间（从而三维空间与一维时间相互独立并完全分离）加三维黎曼弯曲空间的时—空结构，也就是说在这种时—空结构中的一维时间是线性的而三维空间则是弯曲的，而并非如霍金所说：“时间和空间难分难解地相互纠缠。人们不能仅仅弯曲空间而不涉及时间[③]。”正是在这样的时—空结构中时间的测量值才具有“可膨胀性”或“可弯曲性”（实际上这只是比喻说法）。虽然如此，但这并不意味着爱因斯坦的广义相对论从本质上来说是与量子力学不相容的，实际上广义相对论与量子力学在时间结构上的不相容仅仅只是测量意义上的，是表面现象。因为虽然从数学形式上看爱因斯坦的广义相对论中的四维黎曼时—空结构与量子力学的时—空结构是相矛盾的，但由于广义相对论的弯曲的四维时—空结构从本质上来说就是一维线性时间加三维弯曲的空间，因此，从本质上而言广义相对论的时—空结构与量子力学的时—空结构并不矛盾甚至完全一致。同时，由于相对论与量子力学这两个物理学最重要的基础理论近似正确地反映了自然界的规律，因此相对论与量子力学之间本质上的无矛盾性正是自然界本身的无矛盾性的体现。显然，与爱因斯坦的相对论中将

---

① [美]克雷格·卡伦德，尼克·郝盖特．物理与哲学相遇在普朗克标度[M]．李红杰，译．长沙：湖南科学技术出版社，2013：67．

② [美]克雷格·卡伦德，尼克·郝盖特．物理与哲学相遇在普朗克标度[M]．李红杰，译．长沙：湖南科学技术出版社，2013：66—67．

③ [英]史蒂芬·霍金．果壳中的宇宙[M]．吴忠超，译．长沙：湖南科学技术出版社，2012：33．

时间空间化的观念仅仅具有方法论意义不同的是，在这种新的时—空结构中时间与空间是明显不同的对象，而且这种时—空结构才具有真正的本体论意义。而要获得正确的量子引力理论，我们只需保留爱因斯坦广义相对论的四维时—空结构中的三维弯曲黎曼空间（广义相对论描述的所有现象——包括所谓的时间的测量值的膨胀及弯曲——都是由弯曲的空间导致的，或者可以说时间的测量值的膨胀、弯曲现象已经作为结论包含在弯曲的三维空间的前提中），同时将整合在四维时—空中的时间维度用一个独立的时间维度代替（而完全不需要考虑只具有方法论意义的协变性的要求）。在这种时间—空间结构中空间维度与时间维度之间明显是相互独立的，同时这种引力理论中的时—空间结构显然不是虚构的，仅仅只具有方法论意义的结构。当然，仅仅在时—空结构上对广义相对论进行修正还不足以真正解决量子力学与广义相对论之间的相容问题从而最终建立量子引力理论，而包括等效原理、引力场以及引力场中运动物体的能量的量子化等原理则可能是更加重要的、不可或缺的内容。

综合上述所有讨论，我们认为，从本质上来说广义相对论是关于三维弯曲空间而非四维弯曲时—空的理论，正是由于引力场中三维空间的弯曲导致了三维空间中任意两点之间的测地线改变从而导致时钟频率的改变最终导致了对时间测量值（而非时间本身）的改变，而将时间看做是四维黎曼弯曲时—空的结构组成部分的做法并不能改变相应的事实。结合等效原理及前面定义过的“变化路径”的概念，我们可以得到与【结论四】完全相似的结论。

【结论五】 由于引力场完全等同于弯曲的三维黎曼空间，因此相对于惯性系中的观察者而言在引力场中三维黎曼空间的任何两点之间的测地线增大（或膨胀）了，从而物质完成某一变化过程所经历的“变化路径”也同步增加，这样在引力场中物质完成该“变化路径”所需要的时间较惯性系而言也按相同的比例增大了，从而该物质完成同一确定的变化过程所需要的时间间隔（而不是时间本身）具有相对性，其相对性可以分别用公式(1.11)及(1.10)进行描述。

【结论五】与广义相对论完全一致并且已经在诸多实验中得到了证实。我们知道，每一种原子都会发出固定频率（从而振荡周期固定）的电磁波，根据公式(1.10)可知，处于引力场中的某种原子在引力场强度不同之处发出的特定频率的电磁波（在光谱分析仪器中表现为一条谱线）其振荡周期是不同的，低引力势之处该种原子发出的谱线比高引力势之处该种原子发出的该种谱线的振荡周期要小，这就是爱因斯坦在广义相对论中作出的光的引力红移的预言。1960 年科学家 R. V. Pound 与 G. A. Rebka 通过使^{57}Fe核发出的 14.4keV 的 γ 射线下落 22.6J 后观察其被^{57}Fe核的共振吸收的实验，测得该 γ 射线的“相对紫移”量为 $\Delta\gamma/\gamma=(2.57\pm0.26)\times10^{-15}$，而“相对紫移”量的理论计算为 $\Delta\gamma/\gamma=2.46\times10^{-15}$，两者符合得很

好。此实验结果较精确地验证了广义相对论的计算①,完全是因为 γ 射线下落过程中所在空间相对弯曲的结果,因此与【结论五】完全一致。

由广义相对论的引力场方程可知,任何物体周围的空间都会因为物体的质量而弯曲,而且这种弯曲的"四维时—空"可以用四维黎曼时—空来描述,因此,太阳周围的三维空间同样是弯曲的,电磁波经过太阳表面时会因为三维空间的弯曲导致其经历的路径变长(太阳表面的四维黎曼时—空的度规 g_{00} 可以通过引力场的测量值进行计算得到,而后通过公式可以计算电磁波经过太阳表面时经历的路径的长度),从而电磁波完成所经历的路径的变化需要的时间间隔也会增加,这就是所谓的相对论性变化过程变慢现象。为证明这一点,1959 年,美国物理学家欧文·夏皮罗(Irwin Shapiro)利用马萨诸塞州斯特福德的海斯塔克雷达天线进行了实验,方法是当太阳系的某一颗特定的行星在人们对太阳进行观测的视角上恰好位于太阳附近时,将雷达波射向这颗特定的行星表面,而后观察从雷达波射出经过太阳表面弯曲的三维空间到雷达波被行星反射回来,并再次经过太阳表面的弯曲的三维空间直至被科学仪器接收到所需要的时间间隔,并将这一时间间隔与在雷达波射向行星的过程中不经过太阳表面时的情况进行比较。通过近 20 年的实验及收集整理相关的实验数据,截止到 1978 年,欧文·夏皮罗以误差为 0.1%精度证明了与理论计算精确相符的变化过程变慢的结论②,完全是因为雷达波经过太阳表面相对弯曲的三维空间,从而所经过的路径相对增大所造成的结果,因此与【结论五】是完全一致的。

2011 年 2 月,美国标准技术研究院(NIST)的科学家制造出铝离子原子钟,该原子钟 37 亿的误差不超过 1 秒。借助铝离子原子钟,美国标准技术研究院(NIST)的科学家验证了铝离子原子钟在高度相差小于 1 米的情况下原子钟的走时所发生的变化,相关论文刊登在美国《科学》杂志上。NIST 的科学家在实验中使用了两只完全一样的铝离子原子钟,首先,把两只原子钟放在同样的高度上进行调试,使得两套时钟的走时完全一样。然后把其中一只原子钟用液压千斤顶平稳匀速的升高 33cm,两只钟的走时很快就出现了差别,位置较低的原子钟比位置较高的原子钟的走时稍慢,大约每隔 79 年相差 900 亿分之一秒③。该实验较精确地证实了广义相对论的计算,完全是铝离子原子钟内的原子在发生周期性振荡过程中因为空间的相对弯曲导致铝离子原子钟内的原子完成一个振荡周期的路径相对变长从而振荡周期也相对变长的结果,因此与【结论五】完全一致。

---

① [美]K. W. FORD. 经典和近代物理学[M]. 陈刚,等,译. 北京:高等教育出版社,1985:166—167.

② [英]保罗·戴维斯. 关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M]. 崔存明,译. 长春:吉林人民出版社,2002:121—122.

③ 科学家造有史以来最精确钟 验证时空扭曲理论[EB/OL]. [2010—10—10]http://www.sina.com.cn.

我们同样可以看到，这里列举的几个实验以及其他所有关于所谓时间弯曲现象的实验所证明的也都是与物质完成其变化过程所需要的时间的相对增大有关的现象，其本质是相对于引力场强度较低处的参照系中的观察者而言引力场强度较高处的参照系中的空间的相对弯曲，从而物质完成其变化过程所经历的路径相对增大，而根本没有也不可能证明所谓的时间的弯曲，实际上广义相对论中关于时间弯曲的观点完全是对物质完成其变化过程所需要的时间具有相对性这一普遍现象，确切地说是对【结论五】的错误的理解、诠释的结果。综合上述全部讨论，特别是【结论四】、【结论五】，我们可以得到以下更普遍的结论：

【结论六】 **由于参照系之间的相对运动或引力场的存在导致的三维空间的相对膨胀或弯曲而造成在两个参照系中的物质完成某一变化过程所经历的“变化路径”的长度具有相对性，从而在两个参照系中该物质完成同一确定的变化过程所需要的时间间隔(而不是时间本身)具有相对性，其相对值由观察者与该参照系之间的相对运动的速度及该参照系所在三维空间的引力场的强度或黎曼空间的度规所决定，因此对时间间隔的测量值的相对性完全由三维空间的相对膨胀或弯曲造成的。**

1.3 一切物质存在的时间间隔及其完成确定的变化过程所需要的时间间隔具有不确定性

上一节中我们讨论了在狭义相对论及广义相对论所描述的物质对象中物质完成其变化过程所需要的时间具有相对性，即相对于某一参照系中的观察者而言不同参照系中物质完成其同一变化过程所需要的时间是不同的。虽然如此，但对任何一个确定的参照系中的观察者而言在任何一个参照系中某物质对象完成其变化过程所需要的时间仍然是确定的。那么对于具有波粒二象性的微观层次的物质而言物质完成其某一变化过程所需要的时间具有什么样的特点？是否仍然具有确定性呢？我们知道，包括狭义及广义相对论在内的经典物理学都是关于物质变化过程的确定性的描述，即对于任一确定的时刻，根据相应的物理方程都有一组确定的物理量与之对应，也就是说任一物质客体在任一时刻其所有动力学参数都是唯一确定的。下面关于经典物理学的实例都是关于物质变化过程的确定性描述的：①在运动学中物体的位移公式是位移与时间之间的函数关系，我们可以根据位移公式精确计算出该物体在任一时刻的空间位置，也就是说位移公式是对一个物体的运动过程的确定性描述；这也就意味着，我们可以根据位移公式确定在哪一时刻物体出现在确定的空间位置上，即物体完成从一个空间位置到另一个空间位置的变化所需要的时间是完全确定的；②根据牛顿的万有引力定律及牛顿的力学体系，我们可以得到精确描述太阳系的九大行星的运动规律的运动方程(并据此确定各

行星的运动轨迹)，而根据行星的运动方程我们可以相当精确地预言任一时刻行星在空间中的坐标，反过来我们可以根据行星的运动方程确定在哪一时刻行星精确地出现在空间中的特定坐标上，这也就意味行星完成从空间中的一个坐标到另一个坐标的变化过程所需要的时间是确定的；③现代航天技术利用火箭把各种科学仪器甚至人送到太空中甚至太阳系的其他行星的附近进行科学探测，其中最关键的是发射轨道的确定及航天器最终位置的精确定位，而这一切正是借助牛顿力学实现的，科学家借助牛顿力学可以非常精确地计算出运载火箭的轨道、火箭运行过程中每一时刻的空间位置以及航天器最终的位置和到达最终位置的时间，结果真可谓是不差分毫，也就是说运载火箭或者航天器完成从一个空间位置到另一个空间位置的变化所需要的时间是完全确定的。正因为牛顿力学对物质的运动过程的描述是确定性的，从而牛顿力学能够对物质的运动过程作出精确的预言。④由于广义相对论的理论核心——爱因斯坦场方程——是关于空间结构与物质的运动之间的确定性的关系，从而根据空间结构就可以精确地描述物质的变化过程从而据此对物质的变化过程进行精确预言，也就是说广义相对论与牛顿力学一样可以对太阳系的行星的运动过程进行精确描述，并且比牛顿力学要做得更好，广义相对论同样是关于宏观甚至宇观现象的物质运动过程的确定性的描述，所以广义相对论描述的物质对象完成变化过程所需要的时间具有确定性。总之，所有包括狭义及广义相对论的经典物理学所描述的对象被认为其物理量在任何情况下都具有确定性，特别是经典物理学所描述的一切物质完成其变化过程所需要的时间都具有确定性。科学家们曾经因为经典物理学在描述宏观物质变化过程及电磁变化过程方面的巨大的成功，而认为整个宇宙的物质变化过程都可以用经典物理学进行确定性的描述从而任何物质完成其变化过程所需要的时间都是确定的，一度认为如果存在一个万能的精灵在某一时刻能够测得所有构成宇宙的物质粒子的质量、位置及速度等各种物理量，人类就可以精确推断出这一时刻之前及精确预言这一时刻之后的任一时刻整个宇宙的状态及演变过程，甚至包括人类大脑的活动过程乃至人类的思维及意识的结果，也就是说整个宇宙都是决定论的，这种情况正如法国科学家皮埃尔·西蒙·德拉普拉斯(Pierre Simon de Laplace)所说："……必须将宇宙现在的状态，看成是过去状态的结果以及是后续状态的原因。一个智者，若是在某一时刻知道自然中所有的力、组成部分的相对位置，并且由足够的能力将知识应用于分析，他就能将宇宙中从最大的物体到最轻的原子的运动包含在一个公式中，不会有什么东西是不可了解的，不管是未来还是过去，都将一览无余①。"但这种幻觉很快被微观现象中的不确定性以及经典力学中复杂系统所表现出的混沌现象所

① [俄]伊戈尔·诺维科夫.时间之河[M].吴王杰，陆雪莹，闵锐，译.上海：上海科学技术出版社，2001：198.

摧毁，量子力学的出现、牛顿力学中三体及多体系统不可积问题的发现以及宏观现象中大量存在的混沌现象使人们的确定性的观念发生了彻底的转变。而通过下面对量子力学的分析我们得到了与经典物理学中完全不同的结论：即物质对象完成其变化过程所需要的时间具有不确定性。在量子力学中，那些曾经在经典物理学中被物理学家奉为圭臬的确定性观念被超越人类思想范畴的不确定性或者可能性概念所替代，微观物质现象的这种特点被物理学家戏称上帝要通过掷骰子的方式来决定微观物质的每一时刻的行为。

我们知道，按照经典物理学理论可以将机械波（例如声波）、电磁波（例如可见光波）等波动现象看做是以场为媒介将场的振动的能量及动量向空间传播的一种现象。在波动现象中，波场的能量和动量周期性的分布在其传播过程所占据的空间中从而其能量及动量的分布具有广延性（或分散性）；波场可以同时与处于波场中的所有物质发生相互作用并与之实现能量及动量的交换从而使得处于波场中的物质的能量及动量发生相应的变化，而波场的能量及动量则因此发生连续性变化；波场与分布在波场中的能量遵循叠加原理，从而在通过两条相距足够近的平行狭缝（或两个小孔）后会发生干涉现象，而在通过一条狭缝（或单个小孔）后会发生衍射现象；波场在空间中的传播规律可以借助波动方程进行描述，显然在每一时刻波场及其能量没有确定的空间坐标从而没有确定的运动轨迹；与之相应的，小钢珠或沙粒等具有“颗粒性”物质（为与下面我们将要提到的微观粒子加以区别我们暂且称之为宏观粒子）的能量及动量则集中在粒子上（即由整个粒子所携带）从而其能量及动量的分布具有局域性及整体性；宏观粒子既可以通过直接接触（如碰撞）的方式与其他物质体系产生相互作用并实现能量交换，也可以借助场（如电场或磁场）与其他物质体系发生间接相互作用并实现能量交换，并且粒子的能量可以因此发生连续性变化；粒子及其所携带的能量完全不遵循叠加原理，从而不可能像波一样在通过双狭缝或双孔后产生干涉现象、在通过单狭缝或单孔后产生衍射现象。宏观粒子的运动可以借助相对论进行严格描述或由牛顿力学近似描述，显然在每一时刻宏观粒子都同时具有确定的坐标和动量从而按严格确定的轨道运动；这就是说在物质的宏观层次中波场与粒子是截然不同的、互不相容的两种现象，然而令人不可思议的是，在宏观物质的变化过程中完全不相容的波动性与粒子性这两种性质却被微观物质现象巧妙地结合在一起成为不可分割的统一体。人们最早发现的将波动性与粒子性有机结合起来的物质对象是光，但在人类刚开始对光现象进行研究时对光的认识仅仅局限于光到底是波还是粒子，而对于光究竟是波还是粒子的争论自牛顿发现光的色散现象起就开始了。基于光的直线传播及反射性质牛顿认为光是粒子，而基于光具有双缝干涉及单缝衍射现象，与牛顿同一时期的惠更斯以及后来的杨（Thomas Young）以及菲涅尔等物理学家则认为光是一种波，最

终麦克斯韦在建立了电磁学理论特别是麦克斯韦电磁场方程并通过求解电磁场方程进而得到电磁波的波动方程后明确提出光就是电磁波。

但19世纪末20世纪初人类的一系列重大发现却从根本上颠覆了这种观念，而这一系列发现则是由物理学家研究的所谓黑体(电磁)辐射现象导致的。在普朗克以前，物理学家们在使用借助经典电磁理论和统计物理学以及热力学理论推导出来的，描述黑体辐射中电磁波的强度与波长之间的对应关系的黑体辐射的理论公式(其中最具代表性的公式是瑞利—金斯公式和维恩公式)$\rho(\lambda,T)$时发现，由公式计算出来的结果与实验总是不能够很好地吻合。其中，瑞利—金斯公式用于计算高温及低频(波长较长)区域的黑体辐射时计算结果与实验可以较好地吻合，但在计算低温及高频(波长较短)区域的黑体辐射时计算结果就与实验严重偏离，甚至出现无穷大的值即所谓紫外灾难；而维恩公式用于计算低温及高频区域的黑体辐射时计算结果与实验符合得较好，在计算高温低频区域的黑体辐射时计算结果则与实验就出现非常大的偏差。针对这种状况，普朗克经过系统的研究提出了能够与全部实验数据完全吻合的黑体辐射公式，并且对公式的物理意义进行了深入的思考，于1900年首次提出能量子假说。即认为在黑体的腔体内电磁波的能量完全不像经典的电磁理论认为的那样是连续分布的，而是由一个个能量子$\varepsilon=h\gamma$所携带，从而黑体内辐射的能量只能以能量子为单位进行不连续的变化，由此普朗克认为经典电磁理论甚至经典物理学中被当做公理的能量连续分布的观念必须改变。虽然如此，但普朗克仍然认为光在空间还是以波的形式传播，而在这种情况下能量在光波上仍然是连续分布的。德国物理学家爱因斯坦20世纪初通过对普朗克理论的深入研究认为，普朗克虽然提出了最具革命性的能量子概念，但其革命是不彻底的，因为普朗克在其理论中认为光仅仅在被吸收或发射时是以量子的形式进行的，而在空间中传播时仍然以波的形式进行并且光的能量连续地分布在光波中。在认识到普朗克理论的缺陷后爱因斯坦在普朗克量子理论的基础上提出光量子假说，爱因斯坦的光量子假说的理论体系认为，光波的能量是被一个个分立的光子所携带，所有光子的能量及动量分别为$E=h\gamma$及$p=h/\lambda$，其中$h=6.6262\times10^{-34}\mathrm{kg\cdot m^2\cdot s^{-1}}$为普朗克常数，$\gamma$为光波的频率，$\lambda$为光波的波长，光波不但在被发射和吸收时以能量为$E=h\gamma$的量子形式出现，而且以微粒形式在空间中运动。爱因斯坦的光量子假说成功地解释了美国物理学家R. A. 密里根的光电效应实验，从而使得光电效应成为光具有粒子性的有力证据。美国物理学家A. H. 康普顿(A. H. Compton)所作的光子与电子之间的碰撞实验则更直接地证明通常被我们认为是波动现象典型实例的光波却具有粒子性，即光波的能量是集中在具有“颗粒性”的光子上而不是周期性地分布在波场所在的空间中。1924年法国物理学家L. 德布罗意在系统思考光的波动性及粒子性问题并试图用一种统一的、普遍适用

于所有粒子(从而只需将光作为其中的一种特例进行处理)的模型对光的这种特性进行描述时设想如果具有波场特性的光可以具有粒子特性,那么具有真正的粒子特性的微观粒子就应该具有波场的特性,依据这一假设德布罗意提出了著名的德布罗意物质波假说:通常被认为具有粒子特性的任何一个电子或其他微观粒子都应该有一列物质波与之相伴随,其物质波的频率 γ 及波长 λ 由电子或其他微观粒子的能量 $E=mC^2/\sqrt{1-V^2/C^2}$ 及平动动量 $p=mV/\sqrt{1-V^2/C^2}$ 所决定,它们之间的关系为 $E=h\gamma$ 及 $p=h/\lambda$。

在德布罗意提出德布罗意物质波假说后不久的 1927 年,美国物理学家 C. J. 戴维逊(C. J. Davisson)与 L. H. 革末(L. H. Gemer)就合作完成了电子衍射实验,实验证明了通常被人们认为具有"颗粒性"的电子却可以具有波动性。两位物理学家将一定能量的电子束投射到镍单晶的表面(实验中使用的镍单晶的原子间距大约为 $D=2.15\mathring{A}$),射到镍单晶的表面电子会被镍单晶散射,在测量散射电子的强度随散射角的变化规律时发现,散射电子的强度分布呈现出与 X 光的衍射实验完全类似的现象,从而证明了电子同样具有波动性。实验物理学家在此后的一系列科学实验还证明了包括分子、原子、质子、中子等原先被科学家们想象为所有具有"颗粒性"的微观粒子都具有波动性,即这些微观粒子在通过双狭缝(或双孔)后也会像机械波、电磁波一样发生干涉现象,在通过单狭缝(或单孔)后同样会发生波所特有的衍射现象。微观粒子的波动性可以而且只能用频率为 $\gamma=E/h$、波长为 $\lambda=h/p$(其中 E 是微观粒子的能量,p 是微观粒子的动量)的德布罗意物质波的波函数 $\psi(r,t)$ 描述。对于能量为恒定值 E、动量为恒定值 p 的微观粒子,则在时刻 t、空间坐标为 r 的点上该粒子的波函数的值为:

$$\psi(r,t)=Ae^{i(p\cdot r-E\cdot t)/\hbar} \tag{1.12}$$

显然这是单色平面波。其中 i 为虚数单位,$i^2=-1$, $\hbar=\dfrac{h}{2\pi}$。而对于微观粒子的运动速度远低于光速而且粒子的能量与动量均不为恒定值而是随外力的作用发生变化的情况,微观粒子的波函数 $\psi(r,t)$ 则满足薛定谔波动方程。该方程由奥地利物理学家薛定谔提出,因此可以通过求该方程的解的方式确定粒子的波函数 $\psi(r,t)$:

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(r,t)=\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+U(r,t)\right]\psi(r,t) \tag{1.13}$$

式中,m 是微观粒子体系的质量,$\nabla=i\dfrac{\partial}{\partial x}+j\dfrac{\partial}{\partial y}+k\dfrac{\partial}{\partial z}$ 为梯度算符,$U(r,t)$ 是粒子所在的场的势能。这就是说微观粒子具有波场的特性,即具有波动性,而波场则具有粒子特性,即具有颗粒性,从而所有微观物质都具有波粒二象性,也即微观粒子

既不是宏观意义上的波—振动在连续分布的场中的传播,也不是宏观意义上的粒子——具有颗粒性的物质。

为了更好地理解并解释光子、电子等通常认为是具有颗粒性的微观粒子的波动性,从而调和粒子性与波动性之间的矛盾,物理学家开始时普遍认为光子等微观粒子的波动性应该是由大量粒子的平均行为得到的,也就是说是多个粒子之间的相干性所获得的波动性现象。但物理学家随后所实施的更精细的实验证明,即使是单个光子甚至单个电子也具有波动性。如在光的双缝干涉实验中,物理学家G. I. 泰勒(G. I. Taylor)把实验中使用的光源调整得极其微弱,以至于每一时刻只有一个光子通过双狭缝。在实验进行过程中,实验人员起初只能看到一个个光点杂乱无章、没有任何规律地分布在双狭缝后面的屏幕上,但随着实验的持续、屏幕上的光点的增加,在杂乱无章分布的光点中逐渐显现出干涉条纹,以至于最终清晰呈现出来的干涉条纹与采用强光源进行的光的干涉实验中产生的干涉条纹完全一样,不同的是实验中形成的干涉条纹是从一个个光点组成的画面中显现出来的。显然,在实验中光子通过双狭缝后射向后面的屏幕的过程中已经完全没有确定的轨道,从而所有穿过双狭缝的光子并非总是打在屏幕上的同一个点上并集中在一个微小区域中。

另外,物理学家伯格曼(Beagmann)等通过实验证明,即使是单个的电子也同样具有波场的特性,具体的实验方法是在原有戴维逊与革末合作完成的电子衍射实验的基础上进一步减弱电子束的强度,使得每一时刻只有一个电子射向晶体表面并测量被晶体所散射的电子投射到感光胶片上的衍射花样,开始时衍射花样并没呈现,只有一个个散乱分布的电子打在感光胶片上产生的点,随着投射到胶片上的电子产生的点的数量的增加,与戴维逊和革末所作的实验完全相同的衍射花样清晰地呈现出来。该实验清楚地表明,电子的衍射不是众多电子之间的相互作用的结果,而是由单个电子的波动性决定的,也即每个电子完全没有确定的运动轨迹,从而即使是从电子枪的同一点上发射出的电子,由于其被射向晶体表面并被衍射后也不总是打在感光胶片的同一个点上或集中在一个微小区域中。因为如果微观粒子像宏观意义上的粒子一样具有确定的轨道,那么微观粒子在进行单狭缝实验时就只能如宏观粒子一样,在通过单狭缝后打到单狭缝后面屏幕上时粒子的强度所呈现出的是正态分布的花样,而不可能出现衍射花样。显然,衍射条纹较亮处是电子出现的数量较多的区域,相应地德布罗意物质波的强度也较大。为调和微观现象中粒子性与波动性之间的矛盾,还有科学家提出微观粒子是在三维空间中连续分布的微小的波包的观点。波包的空间尺寸与微观粒子的大小属于同一个数量级,波包携带的能量即是微观粒子的能量,但由波函数的傅里叶分析可知波包的结构显然具有不稳定性,这种微观粒子模型与所有微观粒子都具有稳定的结构这

一事实相矛盾，而且波包的概念也不能很好地解释粒子的衍射实验。为协调微观现象中粒子特性与波场特性之间的矛盾，物理学家还陆续提出了其他的解释方案，而由德国物理学家玻恩提出德布罗意物质波的几率解释最终经受了各种物理实验的检验从而被物理学家们普遍接受。

玻恩认为量子力学的波函数 $\psi(r,t)$ 所描述的不是实在的物质性波动从而不是物质性的波列，而描述的是粒子在空间中几率分布的抽象的几率波，确切地说波函数 $\psi(r,t)$ 在某一时刻、空间的某一点上的强度与该时刻该点上粒子出现的几率成正比。因此，微观粒子的波函数 $\psi(r,t)$ 的表达式(1.12)中的空间坐标 r 已经不是粒子的空间坐标而是粒子的波函数所在空间上的一点，并且由波函数可以求出粒子在该空间点及其附近出现的几率；表达式中的时间 t 也不再直接是描述微观粒子的运动过程的一个基本参数，而是描述波函数 $\psi(r,t)$（在量子力学中也被称做粒子的态）的变化过程的时间性的基本参数。我们可以用波函数 $\psi(r,t)$ 的表达式求出波函数在确定的空间坐标 r 上的"振幅"，从而确定微观粒子在该空间坐标上的强度，更确切地说是粒子在空间坐标 r 上出现的几率，从而粒子的空间位置已经不再是时间 t 的函数，这也就意味着微观粒子不可能如宏观粒子一样在每一时刻都有完全确定的位置，从而微观粒子不可能具有宏观意义上的运动轨道。由于微观粒子在波函数 $\psi(r,t)$ 所描述的空间中的某一点的出现已经不是必然事件而是可能性事件，即粒子在波函数 $\psi(r,t)$ 所描述的空间中的任何一点上的出现仅仅只具有可能性而不具有必然性，从而微观粒子完成从波函数所描述的空间中的一点到达另一点的变化过程不是必然的过程，而仅仅是具有可能性的过程（费恩曼在其理论中则将这每一种可能的过程想象为一条粒子所要经历的可能的路径），因此粒子完成从波函数所描述的空间中的一点到另一点的变化过程所需要的时间有多种可能的量值从而也具有不确定性。根据量子力学理论我们可以将这一结论推广至任意的微观粒子状态的变化过程中，从而**在任意的微观现象中粒子完成从一个状态到另一个状态的完全确定的变化过程所经历的过程及时间都具有不确定性，并且微观粒子完成其确定的变化过程所经历的空间路径及时间间隔的不确定性可以用海森堡不确定性关系来描述：**

$$\Delta x \cdot \Delta p \geqslant \hbar/2 \tag{1.14}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geqslant \hbar/2 \tag{1.15}$$

式(1.14)可以被称做动量—坐标的不确定关系，其中 Δx 是粒子在 x 轴上的坐标分布的不确定度；Δp 是粒子的动量分布的不确定度，其意义是对于一个微观粒子而言，当该粒子的空间位置的确定程度越高，则它的动量的不确定程度越低；反之，当该粒子的动量的确定程度越高，则它的空间位置的确定程度就越低。式(1.15)也可称做关于能量—时间的不确定关系，其中 ΔE 通常被认为是用于描述粒子体

系处于某一确定状态时其能量的不确定度；而对于 Δt 的含义在物理学界则有多种解释，最常见的观点是将其理解为时间本身的不确定量，如物理学家戴维斯所表述的："由于量子物理学的奇异规则（如：测不准关系）被认为统治着万事万物，包含引力场在内，因而，不仅时钟而且时间本身将服从测不准关系①。"而按曾谨言教授的观点："Δt 可以理解为该粒子体系的状态性质有明显改变所需要的时间间隔②。"由于在能量—时间不确定关系中 Δt 显然应该是指某种具体的时间间隔，而所有时间间隔都与具体的物质变化过程有关，因此这一观点应该是对能量—时间不确定关系中 Δt 的正确理解。海森堡不确定性关系根源于粒子的波粒二象性，是两个有共轭关系的力学量在任意的量子态中的分布之间的相互制约关系，不确定关系可以通过对德布罗意物质波波包的傅里叶分析而得到，也可以用更一般的方法加以证明。以下是曾谨言教授在其《量子力学教程》中给出的能量—时间不确定关系的一个证明：

"设体系的 Hamilton 量为 H，A 为另一个力学量（不显含 t）。按 3.3.1 节给出的不确定度关系

$$\Delta E \cdot \Delta A \geqslant \frac{1}{2}\left|\overline{[A,H]}\right| \tag{6}$$

其中

$$\Delta E = \left[\overline{(H-\bar{H})^2}\right]^{\frac{1}{2}}, \Delta A = \left[\overline{(A-\bar{A})^2}\right]^{\frac{1}{2}}$$

分别表示在给定状态下能量和力学量 A 的不确定度，利用 4.1 节的式(3)，即

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\overline{A} = \overline{[A,H]}/i\hbar \tag{7}$$

式(6)可表为

$$\Delta E \cdot \Delta A \geqslant \frac{\hbar}{2}\left|\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\overline{A}\right|$$

或

$$\Delta E \cdot \frac{\Delta A}{\left|\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\overline{A}\right|} \geqslant \hbar/2 \tag{8}$$

令

$$\tau_A = \frac{\Delta A}{\left|\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\overline{A}\right|} \tag{9}$$

---

① ［英］保罗·戴维斯. 关于时间——爱因斯坦未完成的革命［M］. 崔存明，译. 长春：吉林人民出版社，2002：241.

② 曾谨言. 量子力学教程［M］. 北京：科学出版社，2003：214.

则得

$$\Delta E \cdot \tau_A \geqslant \hbar/2 \tag{10}$$

这里 τ_A 是 $\overline{A}$ 改变 ΔA 所需要的时间间隔，表征 $\overline{A}$ 变化快慢的周期，在给定状态下，每个力学量 A 都有相应的 τ_A，在所有 τ_A 中，最小的记为 τ，它当然也满足(10)式

$$\Delta E \cdot \tau \geqslant \hbar/2 \tag{11}$$

或写成

$$\Delta E \cdot \Delta t \geqslant \hbar/2 \tag{12}$$

此即能量—时间不确定关系。式中 ΔE 表示体系所处状态能量的不确定度，而 Δt 为该状态的特征时间，可理解为状态性质有明显改变所需要的时间间隔，或变化的周期。式(12)表明，Δt 与 ΔE 的乘积不能都任意小下去，而要受到一定的制约，此即能量—时间不确定关系的物理含义[①]。”

由于粒子体系的能量是不确定的，其不确定度为 ΔE，因此粒子体系的状态性质发生改变所需要的时间间隔 Δt 同样具有不确定性。显然，Δt 的不确定度 δt 同样符合不确定关系(1.15)，即有 $\Delta E \cdot \delta t \geqslant \hbar/2$。这一结论与所有相关物理实验完全一致。即粒子实现状态改变或者完成某一变化过程所需要的时间 Δt(而不是时间本身)具有不确定性，其具体的不确定度由公式(1.15)进行描述。由不确定关系式(1.15)可以推论出，对于一个微观粒子而言，当该粒子实现状态改变或者完成某一变化过程所需要的时间 Δt 的确定度越高，则它的能量的不确定度越低；反之，当该粒子的能量的确定度越高，则它实现状态改变或者完成某一变化过程所需要的时间 Δt 的确定度就越低。

对于不确定关系(1.15)，将其用于相对论量子力学中的粒子的空间坐标的测量可以得到结论：粒子的空间坐标不可能以任意精度进行测定。因为当借助光子对粒子的坐标进行测量时，为提高测量精度必须减小光子的波长 λ，但光子的频率 γ 从而能量 $E=h\gamma$ 因此将随之增大，当光子的能量达到一定值 $E=mC^2$ 时，光子与粒子之间的相互作用就会导致质量为 m 的新粒子的产生。因此对于任何粒子的坐标的测量其精度都不可能优于 $\Delta x=\dfrac{h}{mC}$。这就是说比 Δx 更小的空间间隔在理论意义上是不可观察的，有的科学家因此认为该长度必定具有更深刻的意义。如早在 1930 年，前苏联物理学家阿姆巴楚米杨和伊凡宁柯提出关于量子化空间及量子化时间的假说，认为量子化空间的长度为 $L_0=\dfrac{h}{mC}$，其数量级为 10^{-13} cm；与该空

① 曾谨言. 量子力学教程[M]. 北京：科学出版社，2003：214.

间尺度对应，还存在量子化时间，相应的时间值为 $T_0=\frac{h}{mC^2}$，其数量级为 10^{-24} 秒。在这一假说中量子化的时空被作为最基本的度量单位，这也就意味着一切时间、空间的坐标只能取整数。其实所谓的量子化的时间是对不确定关系(1.15)的错误的理解。这些所谓的量子化时间应该是微观粒子完成其变化过程所需要时间 Δt 的不确定性的最低限度，即微观粒子的变化过程所需要的时间的不确定性不小于 10^{-24} 秒数量级。实际上我们可以列举出许多微观粒子遵循不确定性关系(1.15)的实例。

【例 1-1】我们有时可能要测量在原子过程中 Δt 时间间隔内发射的能量，如果能量是以电磁波的形式发射的，则很短的时间间隔将会限制我们确定波频率 γ 的准确度。假定我们在计数一个波群时波的数目的不确定量为一个波。因为，被研究的波的频率等于我们计数到的(波的)数目被时间间隔除，所以频率测量的不确定量 $\Delta\gamma$ 为

$$\Delta\gamma=1/\Delta t$$

与此相应的能量的不确定量

$$\Delta E=h\Delta\gamma$$

所以

$$\Delta E=h/\Delta t$$

或

$$\Delta E\Delta t\geqslant h$$

更为准确地计算使上式变为

$$\Delta E\Delta t\geqslant \hbar$$ ①

显然，原子在 Δt 时间间隔内发射的电磁波等同于一列宽度约为 $\Delta x=C\Delta t$ 的波包，该波包的能量 E 由光量子携带。Δt 越小，则波包的宽度 Δx 越小，根据不确定关系(1.14)可知光量子的动量 p 的不确定度 $\Delta p\approx\hbar/\Delta x$ 越大，因而光量子的能量 E 的不确定度 $\Delta E\approx\frac{\partial E}{\partial p}\Delta p=v\Delta p$ 也越大；反之，如果 Δt 越大，则波包的宽度 Δx 越大，光量子动量的不确定度 Δp 及能量的不确定度 ΔE 则越小。由于原子向周围空间发射电磁波的同时其能量及动量会产生相应的变化，从而当原子在时间间隔 Δt 内完成发射电磁波的过程后其能量及动量也会产生相应的变化。在此，原子发射电磁波波包前后能量及动量的变化就是其发射的电磁波波包的能量 E 及动量 p，这样，原子发射电磁波后其能量及动量的变化同样具有不确定性，其能量的不确定度由 ΔE 描述、动量的不确定度由 Δp 描述，从而原子完成其能量变化过程所需要的时间间隔 Δt 也具有不确定性，其不确定度由 δt 描述，因此任何相关的物

① [美]阿瑟·贝塞.现代物理概念[M].何瑁,等,译.上海:上海科学技术出版社,1984:82.

理实验都无法精确测得原子的能量发生相应变化(ΔE)的准确时间，显然，ΔE 与 δt 之间存在的关系可由式(1.15)描述。

【例 1-2】设自由粒子的状态用一个波包来描述，波包的宽度$\approx \Delta x$，群速率为 v，(速率 v)相应于经典粒子的运动速度。波包掠过空间某点所需要的时间 $\Delta t \approx \Delta x / v$，这样，此波包所描述的粒子的动量的不确定度为 $\Delta p \approx \hbar / \Delta x$，因此其能量的不确定度 $\Delta E \approx \frac{\partial E}{\partial p} \Delta p = v \Delta p$，所以

$$\Delta t \cdot \Delta E \approx \frac{\Delta x}{v} \cdot v \Delta p = \Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar / 2$$[①]

在此，由于波包的群速度 v 对应于经典粒子的运动速度，而粒子的动量 $p = mv$ 具有不确定性，其不确定度由 Δp 加以描述，由于对于运动速度远低于光速的经典粒子其质量 m 是不变值，因此粒子的速度 v 同样也是不确定的，其不确定度可以由 Δv 加以描述，由公式 $\Delta t \approx \Delta x / v$ 可知粒子从空间中的一点到达空间中的另一点所需要的时间 Δt 也是不确定的。

【例 1-3】设原子处于激发态，它可以通过自发辐射而衰变到基态(稳定态)，其寿命(原子完成由激发态衰变到基态所需要的时间)为 τ。这是一个非定态，其能量的不确定度为 ΔE，称为能级宽度 Γ。实验中可以通过测量自发辐射的光子的能量来测出光子激发态的能量，由于寿命的限制，与自发辐射的光子相应的辐射波列的长度 $\Delta x \approx c\tau$，因而光子动量的不确定度为 $\Delta p \approx \hbar / \Delta x \approx \hbar / c\tau$，能量($E = cp$)的不确定度 $\Delta E = c \Delta p \approx \hbar / \tau$，由于观测到的光子的能量有这样一个不确定度，由之而得出的原子激发态的能量也有一个不确定度，即宽度 Γ，从而有 $\Gamma \tau \approx \hbar$[②]。

而所有相关物理实验的结果告诉我们，处于激发态的原子的寿命都不是恒定值，也就是说处于激发态的原子的寿命是不确定的，因此我们通常所说的处于激发态的原子的寿命都是指其寿命的平均值，从而原子从激发态衰变到基态的变化过程所需要的时间(即处于激发态的原子的寿命)τ 是不确定的，其不确定度 $\delta\tau$ 与该变化过程所涉及的能量的不确定度 ΔE 成反比。

【例 1-4】根据量子电动力学及高能物理实验我们知道，在基本粒子的相互作用过程中都会产生一些中间粒子(即处于共振态的粒子)，这些中间粒子都是不稳定的，并且很快会衰变为其他更加稳定的基本粒子。显然，这些中间粒子的衰变时间 Δt(即寿命)都具有不确定性，从而我们只能给出这些粒子的平均寿命，这些中间粒子衰变时间(即相应粒子的平均寿命 τ)的不确定度 δt 与由此引起的能量变化的不确定度 ΔE 之间由不确定性关系 $\Delta E \cdot \delta t \geqslant \hbar / 2$ 所决定。

---

① 曾谨言. 量子力学教程[M]. 北京：科学出版社，2003：213.

② 曾谨言. 量子力学教程[M]. 北京：科学出版社，2003：213.

【例1－5】20世纪70年代，美国奥斯丁德克萨斯大学的物理学家B.米斯拉(Baidyanath Misra)和G.苏达山(George Sudarshan)经研究发现，当一个原子体系被连续地观测时，原子核就不会发生衰变，即对原子体系连续的测量将把原子体系“冻结”在其初始状态上，抑制其他状态的跃迁。

正如英国物理学家保罗·戴维斯在其著作中对这种现象所作的描述：“你永远探测不到衰变过程中的原子，如果你目不转睛地盯着原子，实际发生的情况是，正是观察这一活动本身干扰了衰变过程，并有效地把原子凝固在其轨道内(即在受激状态下)。这一现象被称为‘看着的水壶效应’，因为它使人联想到看着的水壶永不开(性急也无用)这条谚语①。”为引起人们的高度关注，米斯拉和苏达山将这一现象称做“量子基诺佯谬”。由于在“量子基诺现象”中原子体系的状态变化停止了，有科学家(如彼得·柯文尼和罗杰·海菲尔德)因此认为：“它表明，当一个量子系统被连续地观测的时候，时间实际上停滞了②。”量子物理学家对于“量子基诺现象”存在的可能性或者与量子力学的相容性问题相继给出了不同的证明，其中一个简洁清晰的证明是由中国物理学家张永德和潘建伟先生给出的，从这两位物理学家提出的证明过程可见量子基诺现象“根源于不确定性关系和测量是初态的制备这一事实，两者缺一不可”③。而实验物理学家则通过精确的物理实验证明了“量子基诺现象”，英国物理学家彼得·柯文尼和罗杰·海菲尔德对其进行了简单介绍：“1989年在美国科罗拉多州波尔德的国家标准和技术研究所，有一个研究小组作了一次非常精妙的实验，实验结果支持了量子基诺效应。研究人员对放置在磁场中的5000个荷电铍原子进行了观测。这些原子开始时处于同一能级，由于一个射电频率的电磁场的照射，它们可以在0.256秒内“煮开”，即激发到高能级。只要在这当中比进行任何测量，所有的原子在照射之后都会位于高能级。然而，当用激光在这期间的某个瞬间进行探测时，研究人员发现，他们探测的次数越多，能达到高能级的原子数目就越少：当每隔千分之四秒进行一次探测时，就没有一个原子能够被激发。这样看来，一个被盯着的量子水壶是不会煮开的④。”在量子基诺现象中原子体系因为人们的连续观测而始终被冻结在其初始状态上，因此原子体系的能量可以看做是恒定不变的，从而该原子体系的能量的不确定度$\Delta E=0$，由不确定性关系(1.15)可得，该原子体系要完成从初始状态向其他状态的转变所需要的时间Δt将趋近于无穷大，即$\Delta t\to\infty$，这也就意味着该原子体系从初始状态向其他

① [英]保罗·戴维斯.关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M].崔存明，译.长春：吉林人民出版社，2002：223—224.

② [英]彼得·柯文尼，罗杰·海菲尔德.时间之箭[M].江涛，向守平，译.长沙：湖南科学技术出版社，1995：130.

③ 尹鸿钧.量子力学[M].北京：中国科学技术大学出版社，1999：593.

④ [英]彼得·柯文尼，罗杰·海菲尔德.时间之箭——解开世间最大奥秘之科学旅程[M].江涛，向守平，译.长沙：湖南科学技术出版社，1995：130.

状态转变的速度是无限缓慢的，从而相应的变化过程永远不可能发生，因此我们可以说该原子体系状态的变化过程完全停止了，而非时间本身停止了(在后面的讨论中我们要反复提到时间与物质的变化过程这两个完全不同的概念)。

综上所述，我们可以得到一个具有普遍意义的结论：微观粒子完成其具体的变化过程所需要的时间间隔 Δt(而不是抽象的时间或时间间隔)具有不确定性，而时间间隔 Δt 的不确定度 δt 同样由不确定性关系(1.15)所决定，确切地说粒子完成其具体的变化过程所需要的时间间隔 Δt 的不确定度 δt 由该变化过程所涉及的能量 E 的不确定度 ΔE 所限定，是与能量 E 的不确定度 ΔE 成反比的。由于量子力学的所有结论同样可以用于描述宏观物质现象，这也就意味上述结论同样可以推广至宏观物质层次，只不过在宏观现象中物质完成某一变化过程所需要的时间的不确定度远远超出我们的测量精度范围而被忽略，从而我们可以得到一个更一般的结论：**一切(包括微观及宏观层次的)物质完成其确定的变化过程所需要的时间具有不确定性，该时间的不确定度由海森堡不确定关系所描述。**

1.4 基本的物质变化过程以及描述基本的物质变化过程的物理方程具有时间反演变换不变性

除了上面讨论过的关于物质变化过程的时间性的内容之外，物质变化过程的可逆性、物质变化过程关于时间的对称性变换的性质也是物质的变化过程非常重要的内容，而在物理学中时间反演变换就是用于研究物质变化过程的可逆性或者物质变化过程关于时间的对称性的最重要的数学方法，通常用字母“***T***”表示，物理学界普遍认为这是一种把过去与将来进行互换(即将时间 t 换成 $-t$)从而将时间的方向逆转的运算，实际上无论在经典物理学还是在现代物理学中，时间反演变换都是一个很重要的概念和方法。自 18 世纪 70 年代开始，物理学家借助时间反演变换的概念及方法相继证明了描述质点运动过程的牛顿力学的基本方程，描述电磁现象的麦克斯韦电磁场方程，描述微观物质变化过程的量子力学及量子场论的基本方程，描述高速运动及大范围宇宙空间物质变化过程的狭义及广义相对论的基本方程等都具有时间反演变换不变性。也就是说这些方程可以同时用于描述两个互逆的变化过程，从而得出这些方程所描述的物质变化过程都具有可逆性，即当我们将时间的方向颠倒时相应的物理方程仍然保持不变。特别是物理学家借助时间反演变换概念证明了具有可逆性特征的玻耳兹曼热力学系统的微观模型给出的热力学体系却具有宏观不可逆性(H 定理或熵增原理)，从而导致了著名的“不可逆佯谬”，并且物理学家针对“不可逆性佯谬”提出了各种解决问题的方法，其中最重要的如麦克斯韦提出的著名的麦克斯韦妖模型以及其他如罗施密特(L. Loschmidt)的速度反演模型及策尔梅洛(E. Zermelo)的“复现定理”等重要成果；另

外，量子力学中通过研究时间反演变换得到了克雷莫斯兼并，粒子物理学中通过对在各种相互作用粒子的相互转化过程的研究发现了极其重要的各种相互作用在C、P、T变换联合作用下所具有的不变性即CPT定理，以及在弱相互作用下对时间反演变换对称破缺等重要结果。这一系列重要研究成果的取得证明时间反演变换是物理学中研究物质变化过程的可逆性的非常重要的数学方法，但不可否认的是通常意义上的时间反演变换的概念及方法，同时为人们理解时间的本质问题造成了诸多困难。通过下面的详细讨论我们可以发现，当前许多物理学教材及科普著作中所使用的时间反演变换的概念及经典操作方法存在值得商榷之处，如在对物质变化过程的时间反演变换进行论述时没有考虑变化过程与其逆过程在它们的时间对称点上的微小邻域中的对称性问题，特别是就时间的微分的时间反演变换（即 $t \to t' = -t$，则 $dt \to dt' = -dt$）及所有其他物理量的微分的时间反演变换的理解（即通常认为的直接将 $-t$ 带入物理方程的时间 t 及时间的微分 dt 中的操作性定义）是不正确的。其根源在于人们不自觉地将过去与将来的互换操作（即 $t \to t' = -t$）理解为将时间流逝的方向颠倒的操作，从而无意中将物质变化过程的方向性等同于时间的方向性（这一点在我们后面的讨论中可以发现），并因此导致了时间具有方向性的错误观念。虽然最近几年有物理学家对时间反演变换的概念进行了重新思考及论述，如物理学家张永德先生就在其著作中有相关的论述："经典力学中'时间反演对称性'和'演化过程可逆性'两者是等价的。这是由于，只要力的规律具有时间反演不变性，动力学方程就是时间反演不变的，动力学解就具有演化的可逆性。比如地球绕太阳转动。由于系统具有时间反演变换不变性，地球的正向和逆向运行的两个等能转动轨道解同时存在。两种转动彼此看对方，都认为对方是自己的因果颠倒的逆向运动（其实各自在自己坐标系中看，时间都沿正向消失着，$dt > 0$），仅仅由于初条件选择的破缺，实现了地球沿现在这条轨道转动①。"但是这些全新的观点并没有引起人们足够重视，主要原因在于长期以来时间反演变换与时间倒流变换是等同的变换操作这一观念在人们头脑中已根深蒂固，就连多数著名的学者也不例外，而哲学界对相关问题的讨论则更是以以前物理学中的结论为依据进行的。为此，我们必须对时间反演变换的概念进行全面、系统及详细的诠释，唯有如此，才能正确地理解时间反演变换的意义及进行相应的操作，从而真正理解物质的变化过程的可逆性的本质，而只有完整、清晰的时间反演变换概念才能够对后面关于时间的本质（特别是时间是否具有方向）等问题的论述提供理论依据。在进一步讨论之前我们需要先明确描述物质变化过程的物理量的时间对称变换的定义，在此基础上再对时间反演变换的操作定义进行详细讨论。

---

① 张永德. 量子菜根谭——量子理论专题分析[M]. 北京：清华大学出版社，2012：184.

物理量关于对称轴 $t=0$ 的时间对称变换:假定物理量 Q 随时间 t 的变化过程用函数关系 $Q=Q(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$ 描述,其中 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 为 n 维空间的坐标,t 为时间;$Q(x_{10},x_{20},\cdots,x_{n0},t_0)$ 为 Q 在 $x_1=x_{10},x_2=x_{20},\cdots,x_n=x_{n0}$,$t=t_0$ 时的量值,$Q(x_{11},x_{21},\cdots,x_{n1},t_1)$ 为 Q 在 $x_1=x_{11}$,$x_2=x_{21},\cdots$,$x_n=x_{n1}$,$t=t_1$ 时的量值,令 $t\to t'=-t$,则 $Q(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)\to Q(x_1,x_2,\cdots,x_n,t')=Q(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)$ 即是对物理量 $Q(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$ 关于对称轴 $t=0$ 的时间对称变换。特别的,变换 $Q(x_{10},x_{20},\cdots,x_{n0},t_0)\to Q(x_{10},x_{20},\cdots,x_{n0},t'_0)=Q(x_{10},x_{20},\cdots,x_{n0},-t_0)$ 为 $Q(x_{10},x_{20},\cdots,x_{n0},t_0)$ 关于对称轴 $t=0$ 的时间对称变换,而变换 $Q(x_{11},x_{21},\cdots,x_{n1},t_{11})\to Q(x_{11},x_{21},\cdots,x_{n1},t'_1)=Q(x_{11},x_{21},\cdots,x_{n1},-t_1)$ 为 $Q(x_{11},x_{21},\cdots,x_{n1},t_1)$ 关于对称轴 $t=0$ 的时间对称变换。

下面我们先就随时间 t 变化的物理量 A 为时间的一元函数 $A=A(t)$ 这种最简单的情况进行讨论,即通过对直角坐标系中的曲线 $A=A(t)$ 关于对称轴 $t=0$ 的时间对称变换来说明随时间变化的物理量 A 的时间对称变换的意义,相应的结论可以自然地推论至物理量 A 为时间及空间的多元函数的情况。如图 1-13 所示,我们用直角坐标系中的曲线 $A=A(t)$ 表述物理量 A 从时刻 t_0 到 t_1(显然 $t_1>t_0$)随时间 t 的变化过程,物理量 A 随时间的变化过程的方向如图中曲线 $A=A(t)$ 上所标注的箭头或者曲线上方所标的直线箭头所示。其中 $A=A(t)$ 是曲线 A 在任一时刻 t 的取值,而 $A_0=A(t_0)$ 是曲线 A 在 t_0 时刻的对应值,$A_1=A(t_1)$ 是曲线 A 在 t_1 时刻的对应值。根据关于对称轴 $t=0$ 的时间对称变换的定义,曲线 A 关于对称轴 $t=0$ 的时间对称变换是将 $A=A(t)$ 中的 t 用 $-t$ 替换,由此得到 $A=A(t)$ 上的任意一点 $B(A,t)$ 关于对称轴 $t=0$ 的对称点 $B'(A',-t)$,其中点 $B'_0(A'_0,-t_0)$ 及 $B'_1(A'_1,-t_1)$ 分别为点 $B_0(A_0,t_0)$ 及 $B_1(A_1,t_1)$ 关于对称轴 $t=0$ 的对称点。把由对称变换得到的所有曲线 $A=A(t)$ 上的点的对称点 $B'(A',-t)$ 在图中标注出来得到一条曲线 $A'=A(-t)$,其对应的物理量为 A',显然曲线 $A'=A(-t)$ 即是描述物理量 A 的变化过程的曲线关于对称轴 $t=0$ 的时间对称图形。在图 1-13 中有两种可能的情况,一种情况是对任一时刻 t 都有 $A'=A(-t)=A(t)$,特别的,有 $A_0'=A(-t_0)=A(t_0)$ 及 $A_1'=A(-t_1)=A(t_1)$,如图 1-13 中的①及③所示。如果仅仅从曲线本身看,显然图中的曲线 $A'=A(-t)$ 与曲线 $A=A(t)$ 是以坐标轴 $t=0$ 为对称轴的对称图形,即描述物理量 A 的曲线 $A=A(t)$ 经过时间对称变换后得到的新的曲线 $A'=A'(t)$,在每一时刻的值与描述物理量 A 的曲线 $A=A(t)$,在每一时刻的值关于对称轴 $t=0$ 完全对称,对这种情况,我们称描述物理量 A 的函数关系 $A=A(t)$ 对时间 t 具有偶性;另一种情况是在每一时刻 t 都有关系 $A''=A(-t)=-A(t)$,特别的,存在关系 $A_0''=A(-t_0)=-A(t_0)$ 及 $A_1''=A(-t_1)=-A(t_1)$,

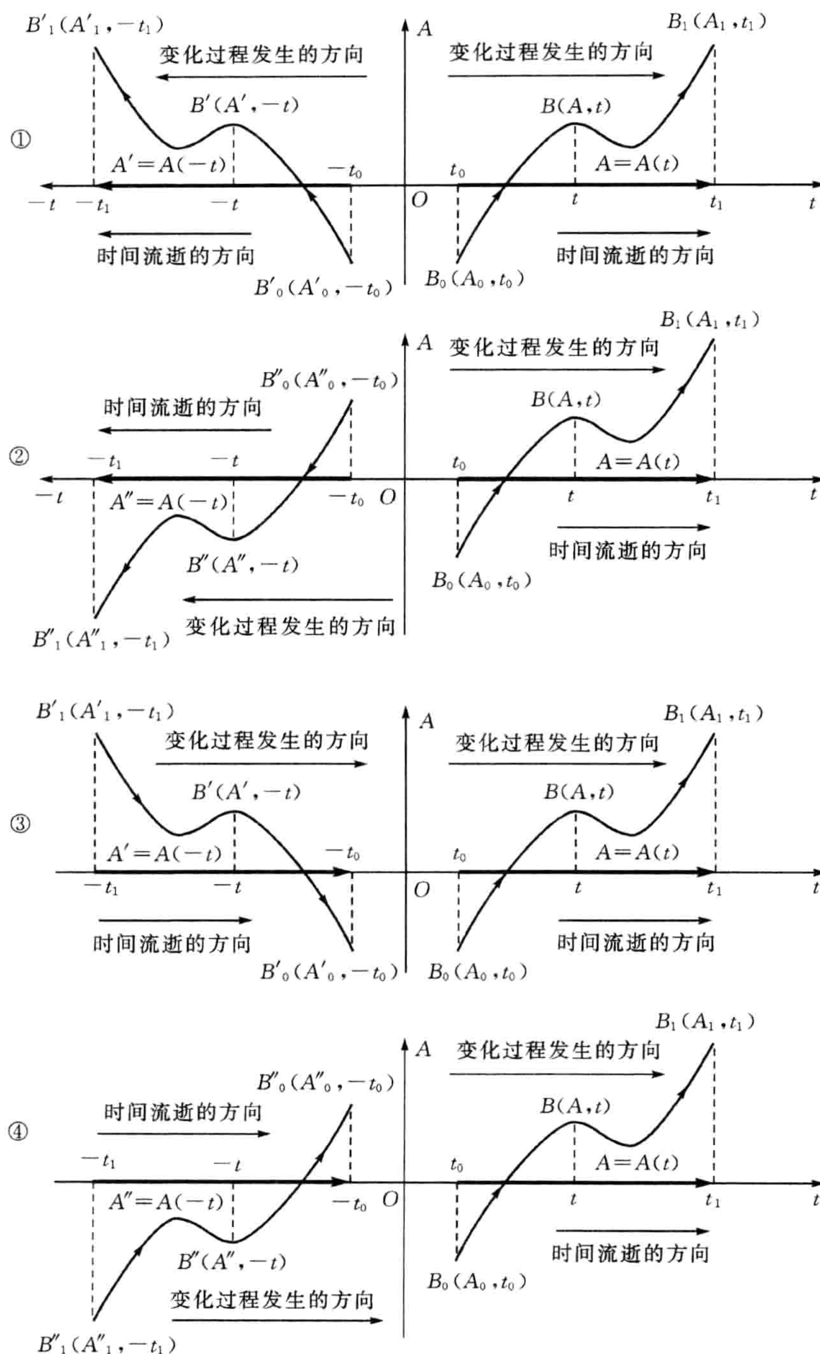


图 1-13　描述物理量 $A(t)$ 的变化过程的曲线关于对称轴 $t=0$ 的时间对称变换

如图 1-13 中的②及④所示。如果仅仅从曲线本身的形状上看，显然图中的曲线 $A''=A(-t)$ 与曲线 $A=A(t)$ 是以直角坐标系的原点为对称中心的中心对称图形，或者说物理量 A 的值经过以直角坐标系的原点为对称中心的对称变换后变为负值。对于这种情况，我们称描述物理量 A 的函数关系 $A=A(t)$ 对时间 t 具有偶性。

对于图 1-13 中的①及②，物理量 A 随时间的变化可以借助曲线 $A=A(t)$ 从点 $B_0(A_0,t_0)$ 到 $B_1(A_1,t_1)$ 的变化过程加以描述，显然 $t_1>t_0$；而物理量 A'(或 A'')随时间的变化则可以借助曲线 $A'=A(-t)$(或 $A''=A(-t)$)，从点 $B'_0(A'_0,-t_0)$(或 $B''_0(A''_0,-t_0)$)到 $B'_1(A'_1,-t_1)$(或 $B''_1(A''_1,-t_1)$)的变化过程加以描述，显然 $-t_0>-t_1$；由于描述物理量 A 的曲线 $A=A(t)$ 与描述物理量 A'(或 A'')的曲线 $A'=A(-t)$ 或 $A''=A(-t)$ 关于对称轴 $t=0$ 对称，因此从曲线的形状及变化过程的方向看，在这种情况下的两个变化过程是在不同的时间区域中发生的完全相同的变化过程，即是说这两个变化过程发生的方向完全相同；从时间流逝的方向看，一则时间从 t_0 到 t_1 的方向流逝，一则时间从 $-t_0$ 到 $-t_1$ 的方向流逝，由于时间流逝的方向可以由下一时刻的时间值与前一时刻的时间值之差加以确定，如由于 $t_1-t_0>0$，即时间从小到大，因此时间从 t_0 到 t_1 的方向为时间流逝的正方向；而由于 $-t_1-(-t_0)=t_0-t_1<0$，即时间由大到小，因此时间从 $-t_0$ 到 $-t_1$ 的方向为时间流逝的负方向，从而时间的流逝方向完全相反。

而对于图 1-13 中的③及④，我们知道，物理量 A 随时间的变化可以借助曲线 $A=A(t)$ 从点 $B_0(A_0,t_0)$ 到 $B_1(A_1,t_1)$ 的变化过程加以描述；而物理量 A'(或 A'')随时间的变化则可以借助曲线 $A'=A(-t)$(或 $A''=A(-t)$)从点 $B'_1(A'_1,-t_1)$(或 $B''_1(A''_1,-t_1)$)到 $B'_0(A'_0,-t_0)$(或 $B''_0(A''_0,-t_0)$)的变化过程加以描述，显然 $-t_0>-t_1$，即 $-t_0-(-t_1)>0$。如果仅仅从描述物理量 A 及物理量 A'(或 A'')的曲线的形状上看，两者显然关于对称轴 $t=0$ 对称；而从曲线的形状及变化进行的方向上看，物理量 A 与 A'(或 A'')的变化过程发生的方向关于对称轴 $t=0$ 并不存在对称关系，也就是说两者是完全不同的变化过程，确切地说两者互为逆过程；但从时间流逝的方向看，一则时间是从 t_0 到 t_1 方向的流逝，一则时间是从 $-t_1$ 到 $-t_0$ 方向的流逝，显然在两个变化过程中时间流逝的方向完全相同，也就是说即使是在过去的时间里，物质的变化过程也与现在的情况一样从未来到现在再到未来，时间的方向同样也是从过去到未来的方向。从上面的讨论我们可以发现一切描述物质的变化过程的物理量 $A=A(t)$ 关于对称轴 $t=0$ 的分立的时间对称变换具有两种情况：其一是不会导致相应的物质变化过程逆转、保持原变化过程发生的方向不变的时间对称变换，但时间流逝的方向却因此发生改变，时间倒流(或反向)变换因此得名，我们将在下一章对这种变换进行详细讨论；其二是导致相应的物质变化过程逆转、但时间流逝的方向却不会发生改变的时间对称变换，即我们经常在

物理学的教材或学术交流中经常接触到的所谓时间反演变换，对此我们即将进行详细讨论。可见，**如果在对描述物质变化过程的物理量 $A=A(t)$ 实施关于对称轴 $t=0$ 的分立的时间对称变换时，物质变化过程的方向与时间流逝的方向二者其中之一的方向在对其进行关于时间的对称变换后发生了变化则另一个的方向就会保持不变，即要么物质变化过程的方向发生改变从而时间流逝的方向必定保持不变，要么时间流逝的方向发生改变从而物质的变化过程的方向必定保持不变。**从图 1-13**中可见，时间流逝的方向与变化过程的方向是意义完全不同的两个方向，虽然一般情况下在描述物质变化过程的(含时间坐标轴的)坐标系中总是假定两者的方向一致的。**如在时间倒流变换中物质变化过程发生的方向保持不变而时间流逝的方向则发生改变，而在时间反演变换中物质变化过程发生的方向发生改变而时间流逝的方向则保持不变，所以在此意义上可以说物质的变化过程与时间是完全不同的对象，关于这一点我们将在后面进行详细的讨论。通过下面的讨论我们将发现，这两种分立的时间对称变换具有许多相似之处，仅仅从经过对称变换后得到的两种变化过程的曲线形状无法对两者进行区分，特别是两种变换最重要的特征是将物理量中的 t 换成 $-t$，即都是关于对称轴 $t=0$ 的时间对称变换，但也存在很大的不同，主要表现在经时间对称变换后得到的曲线的变化方向的不同，而这正是两种对称变换之所以成为不同变换的关键所在。这样，对于时间反演变换的情况如果单纯只是将描述变化过程的物理量中的时间 t 用 $-t$ 代替，即仅仅从物理量关于对称轴 $t=0$ 的时间对称变换这一操作定义上来看，将无法确定变换的结果是否得到了描述物质变化过程的逆过程的物理量，从而无法将其与时间倒流变换区分开的，实际上只有同时对描述物质变化过程的逆过程的物理量的微分的时间反演变换进行详细讨论，才能完全确定变换的结果是否就是原变化过程的逆过程。

下面我们对物理量 $A=A(t)$ 所进行的关于对称轴 $t=0$ 的对称变换为时间反演变换的情况进行详细讨论。由于任何物理量的变化过程都有方向，假定描述物理量 $A=A(t)$ 的变化过程的曲线 $A=A(t)$ 的变化方向是从左到右，即从图 1-13 中的点 $B_0(A_0,t_0)$ 到 $B_1(A_1,t_1)$ 的方向发生变化的，相应的时间流逝的方向则从 t_0 到 t_1，如图 1-13③及④中的变化过程发生的方向所标注的箭头所示。现将描述物理量 A 的变化过程的曲线 $A=A(t)$ 以直线 $t=0$ 为对称轴作时间反演变换，得到以 $t=0$ 为对称轴从而与物理量 A 对称的变化过程如图 1-13③、④中的曲线 $A'=A(-t)$ 或 $A''=A(-t)$ 所示。由于时间反演变换导致物理量 $A=A(t)$ 的变化过程的方向发生逆转，也就是导致与物理量 $A=A(t)$ 的变化过程的方向完全相反的变化过程，我们将该变化过程用物理量 $A'=A(-t)$ 加以描述，而要使物理量 $A'=A(-t)$ 的变化过程成为物理量 $A=A(t)$ 的变化过程的逆过程，即要使物理量 $A'=A(-t)$ 的变化过程发生的方向与物理量 $A=A(t)$ 的变化过程发生的方向相反，从图

1－13 中可见物理量 $A'=A(-t)$ 的变化过程必须从点 $B'_1(A'_1,-t_1)$ 到点 $B'_0(A'_0,-t_0)$ 的方向进行，相应的时间流逝的方向则从 $-t_1$ 到 $-t_0$，如图 1－13③及④中的变化过程发生的方向所标注的箭头所示。从图 1－13 中的③及④可见，无论是物理量 $A=A(t)$ 的变化过程还是其时间反演过程，时间流逝的方向都是从左到右（即时间从小到大的方向，如在图 1－13 的③及④中物理量 A 的原变化过程的时间流逝方向是从 t_0 到 t_1，而其时间反演物理量 A' 的时间流逝方向是从 $-t_1$ 到 $-t_0$），由此可见，如果仅仅从曲线的形状上看，物理量 $A=A(t)$ 与其时间反演物理量 $A'=A(-t)$ 的变化过程是关于对称轴 $t=0$ 对称的，但如果从变化过程发生的方向上看，两者关于对称轴 $t=0$ 是完全不对称的。因此我们得到一个关于时间的对称变换为时间反演变换所应具备的前提条件：**要使得物理量 $A=A(t)$ 经过时间反演变换后获得的变化过程与物理量 $A=A(t)$ 的原变化过程互为逆过程（即两个物理变化过程发生的方向均以图 1－13③及④中所标注的箭头的方向进行），就必须假定物理量 $A=A(t)$ 的时间反演过程中的时间 t 与物理量 $A=A(t)$ 的原变化过程中的时间 t 都严格按相同的方向流逝，在这里显然是按从小到大的方向即时间的正方向流逝的（从而在物理量 $A=A(t)$ 的时间反演变换的过程中的时间虽然是负值，但时间仍然是按从小到大的方向流逝的），即时间流逝的方向不会因为对物质的变化过程或描述物质变化过程的物理量的时间反演变换而发生改变**；否则，对物理量 $A=A(t)$ 的变化过程进行时间反演变换所得到的物理量 $A=A(t)$ 的时间反演过程，就不可能是物理量 $A=A(t)$ 的原变化过程的逆过程，而只能是与其原变化过程完全一样的变化过程，而这种关于对称轴 $t=0$ 的时间对称变换显然不再是时间反演变换而是时间倒流变换。这一结论可以直接推广至物理量 A 为自变量 $x_1,x_2,\cdots,x_n,t$ 的多元函数即 $A=A(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$ 的情况。显然从时间流逝的方向上看，时间反演变换与时间倒流变换是两种完全不同的关于对称轴 $t=0$ 的时间对称变换，正如刘希明教授在其著作中引述德国物理学家的观点：“魏格纳（Wigner）在量子力学中引进时间反演变换的概念时指出，时间反演变换不是时间的倒流变换，而是运动方向的倒转[①]”的根本原因。下面我们就描述物质的变化过程的物理方程的时间反演变换进行简单的定义。

物理方程的时间反演变换：对于描述物质变化过程的物理方程 $F(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)=0$，令 $t\to t'=-t$，则对方程的左边有 $F(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)\to F(x_1,x_2,\cdots,x_n,t')=F(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)$，这样方程 $F(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)=0$ 即为方程 $F(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)=0$ 的时间反演变换。确切地说物理方程 $F(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)=0$ 的时间反演变换是把该方程中涉及的每一个物理量及物理量的微分都用其经过时间反

① 刘希明. 高等量子力学[M]. 济南：山东科学技术出版社，2002：229.

演变换后的物理量及物理量的微分替代，经过整理后所得到的新的方程即是对物理方程 $F(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)=0$ 进行的时间反演变换。由此我们可以得到描述物质变化过程的物理方程的时间反演不变性的定义：**如果把描述某一物质变化过程的物理方程中涉及的每一个物理量都用其经过时间反演变换的物理量替代并经整理后所得到的物理方程的数学形式与原方程的数学形式完全相同，则说该物理方程具有时间反演变换不变性。**

从对描述物质变化过程的物理方程的时间反演变换的定义可知，在物理方程的时间反演变换中没有任何附加条件，而且物理方程的时间反演变换仅仅是对物理方程关于对称轴 $t=0$ 的时间对称变换，是用于检验描述物质变化过程的物理方程关于物质变化过程的对称性的一种数学方法。由于相关的物理方程是用于描述物质的变化过程的，因此物理方程的时间反演变换即是用于研究物质的变化过程的对称性或可逆性的。可见，物质变化过程的时间反演变换是通过数学工具导致用数学描述的物质变化过程（而非实际发生的物质变化过程）逆转的一种方法，仅仅具有方法论的意义。显然，物质变化过程的时间反演变换完全等效于对该物质变化过程的全程录像或摄影进行倒放，当我们把所录制的影像进行倒放时所看到的变化过程即是原变化过程的逆过程，只不过前者是用静态的数学的研究方法进行变换而后者则是动态的影像手段进行显示，正如我们可以对变化过程所录制的影像进行倒放并不意味该变化过程就成为可逆的一样，可以对物质的变化过程进行时间反演变换也不意味该物质的变化过程必定具有可逆性。通过下面的讨论我们可以得到如下结论：在物理学中描述最基本的物质变化过程的物理方程都具有时间反演变换不变性。

1.4.1 常见物理量、物理量的微分及物理量的常用算符的时间反演变换

我们现在根据上述关于物理量的时间反演变换的定义对一些常见的物理量等的时间反演变换进行讨论，更为简洁系统的论述见本书最后所附论文。

假定某一物理量 $K=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$，令 $t\to t'=-t$，即对物理量 K 进行时间反演变换，显然物理量 K 与其时间反演物理量 K' 之间存在两种可能的情况，第一种情况是：$K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)\to K'(x_1,x_2,\cdots,x_n,t')=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)=K(x_1,x_2\cdots,x_n,t)$，即物理量 K 与其时间反演物理量 K' 之间具有相等关系，也就是说对物理量 $K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$ 进行时间反演变换后得到的物理量 $K'(x_1,x_2,\cdots,x_n,t')$ 不变号，通常我们称之为该物理量对时间反演变换具有偶性。第二种情况是：$K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)\to K'(x_1,x_2,\cdots,x_n,t')=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)=-K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$，即物理量 K 与其时间反演物理量 K' 之间绝对值相等而符号相反，通常我们称之为该物理量对时间反演变换具有奇性，对这种情况我们将在后

面进行详细讨论，我们先就物理量 $K(x_1, x_2, \cdots, x_n, t)$ 对时间反演变换具有偶性的情况进行讨论。可以证明如下物理量的时间反演物理量具有偶性：x——空间位置（坐标），F——作用力，a——加速度，E——能量，Φ——电势，E——电场强度，D——电位移，ρ——电荷密度，P——电极化强度等。

我们同样先讨论最简单的情况，假定物理量 K 的函数关系 $K=K(t)$ 如图 1-14 中的曲线所示。描述该变化过程的曲线 $K=K(t)$ 上有两点 $P_1(K_1, t_1)$ 及 $P(K, t)$ 分别表示物理量 K 在时刻 t_1 及任一时刻 t 时的量值，则物理量 K 从时刻 t 到 t_1 产生变化为 $\Delta K=K(t_1)-K(t)$，如图 1-14 中的 ΔK 所示。令 $t_1=t+\Delta t$，则有关系

$$\Delta K=K(t_1)-K(t)=K(t+\Delta t)-K(t)$$

令 $\Delta t\to 0_+$，则 $t_1=t+\mathrm{d}t\to t$，ΔK 的右极限为

$$\lim_{\Delta t\to 0+}\Delta K=\lim_{\Delta t\to 0+}(K(t_1)-K(t))=\lim_{\Delta t\to 0+}(K(t+\Delta t)-K(t))=\mathrm{d}K(t)$$

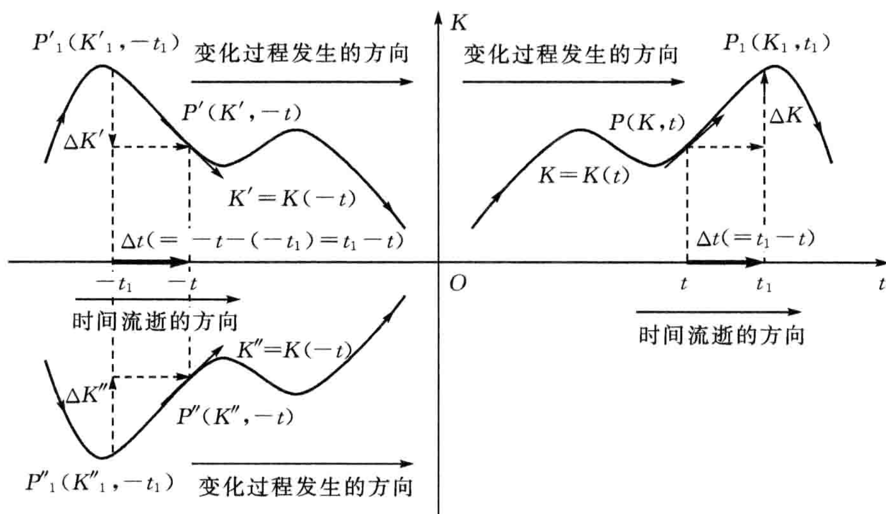


图 1-14　物理量 K 的变化过程的时间反演变换导致该物理量的变化过程的逆转

且曲线 $K=K(t)$ 在时刻 t 沿 t 轴正方向（即变化发生的方向）的导数（即在该点上的斜率）是 $\mathrm{d}K/\mathrm{d}t$，在此 $\mathrm{d}t>0$。现在我们对物理量 K 进行时间反演变换，即以直线 $t=0$（或 K 轴）为对称轴做曲线 $K=K(t)$ 的对称图形，得到图 1-14 中的曲线 $K'=K(-t)$，显然在以直线 $t=0$ 为对称轴的每一个对称时刻如 t_1（或 t）与 $-t_1$（或 $-t$），相应的物理量 K 的量值如 $K(t_1)$（或 $K(t)$）与 $K'(-t_1)$（或 $K'(-t)$）相等，即 $K'_1=K(-t_1)=K(t_1)$ 及 $K'=K(-t)=K(t)$。从图 1-14 中可见不论是物理量 K 还是其时间反演物理量 K'，两者的变化过程都是以图中标明的“从左到右”

的方向发生的，这与物质的变化过程以及对这些过程录制的影像进行倒放时所看到的变化过程都是在正向流逝的时间中发生的情况是完全一样的，如图 1-14 中标注的箭头所示。显然，描述物理量 K 变化的曲线与对其经过时间反演变换后得到的反演物理量 K' 在关于直线 $t=0$ 为对称轴的两个时刻及微小邻域内对应的反演物理量量值的增减性发生了明显的变化，即如果在从时刻 t 到时刻 $t+\Delta t$ 的微小邻域内物理量 K 的值是单调增加的，则在与之对称的从 $-t-\Delta t$ 到时刻 $-t$ 的微小邻域内反演物理量 K' 的值就是单调减小的，反之则单调增大。与物理量 $K(t)$ 从时刻 t 到时刻 t_1 产生的变化 $\Delta K=K(t_1)-K(t)$ 相对应，时间反演物理量 $K'=K(-t)$ 的变化过程的发生显然是从时刻 $-t_1$ 到 $-t$ 的方向进行的，而从时刻 $-t_1$ 到时刻 $-t$，$K'=K(-t)$ 产生的变化 $\Delta K'=K(-t)-K(-t_1)$ 如图 1-14 中的 $\Delta K'$ 所示。这里 $-t_1=-t-\Delta t$。令 $\Delta t\to 0_-$，则 $-t_1=-t-\mathrm{d}t\to -t$，并且 K' 的微分 $\mathrm{d}K'$ 即 $\Delta K'$ 的左极限为

$$\mathrm{d}K'=\lim_{\Delta t\to 0+}\Delta K'=\lim_{\Delta t\to 0+}(K(-t)-K(-t_1))$$

由于 $K(-t_1)=K(t_1)$，$K(-t)=K(t)$，所以有

$$\begin{aligned}\mathrm{d}K'&=\lim_{\Delta t\to 0+}(K(-t)-K(-t_1))\\&=\lim_{\Delta t\to 0+}(K(t)-K(t_1))\\&=-\mathrm{d}K(t)\end{aligned}$$

即对时间反演变换具有偶性的物理量 $K=K(t)$ 在时刻 t 的微分 $\mathrm{d}K(t)$ 与其时间反演物理量 $K'=K(-t)$ 在时刻 $-t$ 的微分 $\mathrm{d}K'(-t)$ 之间存在关系

$$\mathrm{d}K'=\mathrm{d}K(-t)=-\mathrm{d}K(t)$$

并且曲线 $K'=K'(t)$ 在时刻 $-t$ 上沿 t 轴正方向(即变化发生的方向)的导数是 $\mathrm{d}K'(-t)/\mathrm{d}t$，在此 $-t-(-t_1)=\mathrm{d}t$ 即是物理量 $K=K(t)$ 与其反演物理量 $K'=K'(-t)$ 分别在时刻 t 与时刻 $-t$ 在变化方向上发生微小变化所需要的时间，即不论是原变化过程还是其逆过程，在它们的变化方向上发生变化所需要的时间都是正数，即 $-t-(-t_1)=t_1-t=\mathrm{d}t>0$，即在时间增大的方向上，物理量 $K=K(t)$ 与其反演物理量 $K'=K'(-t)$ 分别在时刻 t 与时刻 $-t$ 上的微分的符号相反。这一结论与图 1-14 中的物理量 K 在曲线上 $P(K,t)$ 点处的切线及其反演物理量 K' 在 $P'(K',-t)$ 点处的切线二者中一个指向增大的方向，而另一个指向减小的方向的情况完全一致。

从上面的推导过程看，得到结论 $\mathrm{d}K'(-t)=-\mathrm{d}K(t)$ 的步骤是先对物理量 K 进行时间反演变换，而后再对物理量 K 及其时间反演物理量 K' 进行求微分运算，其实这一步骤也可倒过来进行操作，即先对物理量 K 进行求微分运算得到新的物理量 $\mathrm{d}K(t)$，而后将 $\mathrm{d}K(t)$ 作时间反演变换后得到 $\mathrm{d}K(t)$ 的时间反演物理量 $\mathrm{d}K'$

$(-t)$，这种情况下同样有关系 $\mathrm{d}K'(-t)=-\mathrm{d}K(t)$，即时间反演变换与微分运算这两个操作的先后顺序不会对结果产生任何影响，即令 $t\to t'=-t$，则 $K(t)\to K'(-t)$，且 $K'(-t)=K(t)$，则有 $\mathrm{d}K'(-t)=-\mathrm{d}K(t)$，而令 $t\to t'=-t$，则 $\mathrm{d}K(t)\to \mathrm{d}K'(-t)$，且 $K'(-t)=K(t)$，则 $\mathrm{d}K'(-t)=-\mathrm{d}K(t)$ 两种操作方式等效。显然，这一结论可以直接推广至物理量 K 为多元函数的情况，即对于物理量 $K=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$，其中 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 为自变量，t 为时间，并且物理量 K 对时间反演变换具有偶性，则以 $t=0$ 为"对称面"进行时间反演变换后得到的时间反演物理量 $K'=K'(x_1,x_2,\cdots,x_n,t')=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)$ 在时刻 t 对时间的偏微分 $\mathrm{d}K'$ 与物理量 $K=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$ 在时刻 t 对时间的偏微分 $\mathrm{d}K$ 之间存在关系 $\mathrm{d}K'(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)=-\mathrm{d}K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$。同样的，这里的两个操作即时间反演变换和微分运算实施的次序不会对结论产生任何影响。如对于电场强度 E，令 $t\to t'=-t$，则 $E\to E'=E$，$\mathrm{d}E\to \mathrm{d}E'=-\mathrm{d}E$；对于电位移 D，令 $t\to t'=-t$，则 $D\to D'=D$，$\mathrm{d}D\to \mathrm{d}D'=-\mathrm{d}D$；对于电荷密度 ρ，令 $t\to t'=-t$，则 $\rho\to\rho'\to\rho$，$\mathrm{d}\rho\to \mathrm{d}\rho'=-\mathrm{d}\rho$。

结合上述分析我们可以得到以下结论：即上面所列的物理量除了空间坐标外对时间反演变换具有偶性的物理量 $K=K(t)$ 或 $K=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$，其时间反演物理量为 $K'=K(-t)$ 或 $K'=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)$，从而有关系式 $K(-t)=K(t)$（或 $K(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$），则反演物理量 K' 在时间正向流逝方向上每一时刻的微分，或关于时间的偏微分及对时间的导数，或偏导数，是原物理量 K 在对称时刻的微分，或关于时间的偏微分及对时间的导数或偏导数的相反数。即对时间反演变换具有偶性的物理量 K，如果该物理量 K 的微分或偏微分及对时间的导数或偏导数存在并且不等于常数，则该物理量 K 在时间正向流逝方向上每一时刻的微分或偏微分及对时间的导数或偏导数，对时间反演变换具有奇性。即对于 $t\to t'=-t$，如果 $K'=K(-t)=K(t)$ 或 $K'=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$，并且 $\mathrm{d}K(t)$ 或 $\mathrm{d}K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$ 及 $\mathrm{d}K(t)/\mathrm{d}t$（或 $\frac{\partial K}{\partial t}$）存在并且不等于常数，则有

$$\mathrm{d}K\to \mathrm{d}K'=\mathrm{d}K(-t)=-\mathrm{d}K(t)$$

或 $$\mathrm{d}K\to \mathrm{d}K'=\mathrm{d}K(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)=-\mathrm{d}K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$$

$$\mathrm{d}K(t)/\mathrm{d}t\to \mathrm{d}K'(t')/\mathrm{d}t'=-\mathrm{d}K(t)/\mathrm{d}t$$

或 $$\frac{\partial K}{\partial t}\to\frac{\partial K'}{\partial t'}=-\frac{\partial K}{\partial t}$$

据此可以证明，对时间反演变换具有偶性的物理量 $K=K(t)$ 或 $K=K(x_1,x_2,$

$\cdots, x_n, t)$，如果该物理量 K 对时间的 $2n+1$ 阶导数或偏导数存在并且不等于常数，则该物理量 K 在时间正向流逝的方向上每一时刻对时间的 $2n$ 阶导数或偏导数对时间反演变换具有偶性；并且该物理量 K 在时间正向流逝的方向上每一时刻对时间的 $2n+1$ 阶导数或偏导数对时间反演变换具有奇性。即对于 $t \to t' = -t$，如果 $K' = K(-t) = K(t)$（或 $K' = K(x_1, x_2, \cdots, x_n, -t) = K(x_1, x_2, \cdots, x_n, t)$），并且 $\mathrm{d}^{2n+1}K(t)/\mathrm{d}t^{2n+1}$（或$\dfrac{\partial^{2n+1}K}{\partial t^{2n+1}}$）存在并且不等于常数，则有

$$\mathrm{d}^{2n}K(t)/\mathrm{d}t^{2n} \to \mathrm{d}^{2n}K'/\mathrm{d}t'^{2n} = \mathrm{d}^{2n}K(-t)/\mathrm{d}t^{2n} = \mathrm{d}^{2n}K(t)/\mathrm{d}t^{2n}$$

或

$$\frac{\partial^{2n}K}{\partial t^{2n}} \to \frac{\partial^{2n}K'}{\partial t'^{2n}} = \frac{\partial^{2n}K}{\partial t^{2n}}$$

$$\mathrm{d}^{2n+1}K(t)/\mathrm{d}t^{2n+1} \to \mathrm{d}^{2n+1}K'/\mathrm{d}t'^{2n+1} = \mathrm{d}^{2n+1}K(-t)/\mathrm{d}t^{2n+1} = -\mathrm{d}^{2n+1}K(t)/\mathrm{d}t^{2n+1}$$

或

$$\frac{\partial^{2n+1}K}{\partial t^{2n+1}} \to \frac{\partial^{2n+1}K'}{\partial t'^{2n+1}} = -\frac{\partial^{2n+1}K}{\partial t^{2n+1}}$$

其中 $n=1,2,3\cdots$这一结论与通常物理教材中提到的"时间反演变换下具有时间的奇次幂的力学量变号的结论"完全一致，但数学表达形式及意义则截然不同。由此可以得到结论，质点的位移对时间反演变换具有偶性，从而质点位移的微分（对应于质点的速度）对时间反演变换具有奇性，质点位移的二阶微分（对应于质点的加速度）对时间反演变换具有偶性。其次，由于空间坐标对时间反演变换具有偶性，从而进行时间反演变换后空间坐标不会发生任何改变，即时间反演变换不会对空间坐标产生任何影响。特别的，假定物理量 $K(x, y, z, t)$ 对时间反演变换具有偶性，由于物理量 $K(x_1, x_2, x_3, t)$ 经过时间反演变换得到的反演物理量 $K' = K(x_1, x_2, x_3, -t)$ 的符号没有改变，即对于 $t \to t' = -t$ 有关系 $K' = K(x_1, x_2, x_3, -t) = K(x_1, x_2, x_3, t)$，而且物理量 $K(x_1, x_2, x_3, t)$ 的时间反演物理量 $K' = K(x_1, x_2, x_3, -t)$ 仅仅在时间轴上进行了反演变换而在其他三个坐标轴（x_1 轴、x_2 轴、x_3 轴）上没有任何改变，这样，物理量 $K(x_1, x_2, x_3, t)$ 对 x_1, x_2, x_3 的一阶及二阶偏导数对时间反演变换具有偶性，即如果令 $t \to t' = -t$，则有

$$\frac{\partial K(x_1, x_2, x_3, t)}{\partial x_i} \to \frac{\partial K'(x'_1, x'_2, x'_3, t')}{\partial x'_i} = \frac{\partial K(x_1, x_2, x_3, t)}{\partial x_i}$$

$$\frac{\partial K(x_1, x_2, x_3, t)}{\partial t} \to \frac{\partial K'(x'_1, x'_2, x'_3, t')}{\partial t'} = -\frac{\partial K(x_1, x_2, x_3, t)}{\partial t}$$

及

$$\frac{\partial K^2(x_1, x_2, x_3, t)}{\partial x_m x_n} \to \frac{\partial K'^2(x'_1, x'_2, x'_3, t')}{\partial x'_m x'_n} = \frac{\partial K^2(x_1, x_2, x_3, t)}{\partial x_m x_n}$$

$$\frac{\partial K^2(x_1, x_2, x_3, t)}{\partial t^2} \to \frac{\partial K'^2(x'_1, x'_2, x'_3, t')}{\partial t'^2} = \frac{\partial K^2(x_1, x_2, x_3, t)}{\partial t^2}$$

当 $m=n$ 时有

$$\frac{\partial K^2(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial x_i^2} \to \frac{\partial K'^2(x'_1,x'_2,x'_3,t')}{\partial x'^2_i} = \frac{\partial K^2(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial x_i^2}$$

其中 i、m、n 的取值为 1,2,3。由此可得 $\nabla \cdot K \to \nabla \cdot K' = \nabla \cdot K$, $\nabla \times K \to \nabla \times K' = \nabla \times K$,**即对时间反演变换具有偶性的物理量其散度及旋度对时间反演变换也具有偶性。**

以上我们详细讨论了物理量 K 与其时间反演物理量 K'之间有两种可能的关系中的第一种情况。现在我们对物理量 K 与其时间反演物理量 K''之间的第二种情况即物理量 K 对时间反演变换具有奇性的情况进行详细讨论。可以证明,以下物理量对时间反演变换具有奇性:t——时刻,V——速度,p——动量,L——角动量(包括轨道和自旋),A——电磁矢势,B——磁感应强度,H——磁场强度,J——电流密度,M——磁化强度,S——坡印廷矢量等。现在我们对物理量 $K(t)$进行时间反演变换,即以原点为对称中心做曲线 $K=K(t)$的中心对称图形,得到图 1-14 中的曲线 $K''=K(-t)$,从图 1-14 中可见,在以 t 轴的原点为对称中心的任一对称的时刻如 t_1(或 t)与 $-t_1$(或 $-t$),相应的物理量的值如 $K(t_1)$(或 $K(t)$)与 $K_1(-t_1)$(或 $K(-t)$)互为相反数,即 $K''_1=K(-t_1)=-K(t_1)$及 $K''=K(-t)=-K(t)$,显然,不论是物理量 $K=K(t)$还是其反演物理量 $K''=K(-t)$,其变化过程都是按图 1-13 中标明的"从左到右"的方向发生的,如图 1-13 中所示。与物理量 $K(t)$从时刻 t 到时刻 t_1 产生的变化为 $\Delta K=K(t_1)-K(t)$相对应,其时间反演物理量 $K''=K(-t)$从时刻 $-t_1$ 到时刻 $-t$ 产生的变化为 $\Delta K''=K(-t)-K(-t_1)$如图 1-14 中的 $\Delta K''$所示。由于 $K''_1=K(-t_1)=-K(t_1)$,$K''=K(-t)=-K(t)$,所以有

$$\Delta K''=K(-t)-K(-t_1)=-K(t)-[-K(t_1)]=\Delta K$$

这里 $-t_1=-t-\Delta t$,令 $\Delta t\to 0_-$,则 $-t_1=-t-\mathrm{d}t\to -t$,则 K''的微分 $\mathrm{d}K''$即 $\Delta K''$的左极限为

$$\mathrm{d}K''(-t)=\lim_{\Delta t\to 0}\Delta K''=\lim_{\Delta t\to 0-}(K(t_1)-K(t))=\mathrm{d}K(t)$$

并且曲线 $K''=K(-t)$在时刻 $-t$ 上沿 t 轴正方向(即变化发生的方向)的斜率是 $\mathrm{d}K''(t)/\mathrm{d}t$,显然 $\mathrm{d}t>0$。即对于物理量 $K=K(t)$,并且物理量 K 对时间反演变换具有奇性,则以 $t=0$ 为对称轴进行时间反演变换后得到的时间反演物理量 $K''=K(-t)$在时刻 t 对时间的微分 $\mathrm{d}K''$与物理量 $K=K(t)$在时刻 t 对时间的微分 $\mathrm{d}K$ 之间存在关系 $\mathrm{d}K''=\mathrm{d}K$,即在时间增大的方向上,物理量 $K=K(t)$与其反演物理量 $K''=K(-t)$分别在时刻 t 与时刻 $-t$ 上的微分的符号相同。这一结论与图 1-14 中物理量 K 在 $P(K,t)$点上的切线与其反演物理量 K''在 $P''(K'',-t)$点上的切线两者均指向增大的方向的情况完全一致。

显然,这一结论可以直接推广至物理量 K 为多元函数的情况,即对于物理量

$K=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$,并且物理量 K 对时间反演变换具有奇性,则以 $t=0$ 为对称平面进行时间反演变换后得到的时间反演物理量 $K''=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$ 在时刻 t 对时间的偏微分 $\mathrm{d}K''$ 与物理量 $K=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$ 在时刻 t 对时间的偏微分 $\mathrm{d}K$ 之间存在关系 $\mathrm{d}K''=\mathrm{d}K$。如对时间 t,令 $t\to t'=-t$,由于 t 具有奇性,因此 $\mathrm{d}t\to\mathrm{d}t'=\mathrm{d}(-t)=\mathrm{d}t$,这里显然与当前教材中介绍的知识是完全不同的,这也就是说时间反演变换虽然改变了变化过程的方向,使得一切物质的变化过程经过时间反演变换后成为相应变化过程的逆过程,但却没有改变时间的流逝方向,时间仍然是正向流逝的,即正如德国物理学家魏格纳曾经正确指出过的:时间反演变换不是时间的倒流变换而是运动方向的逆转变换。又如对于运动速度 V,由于速度 V 对时间反演变换具有奇性,令 $t\to t'=-t$,则 $\mathrm{d}t\to\mathrm{d}t'=\mathrm{d}(-t)=\mathrm{d}t$,$V\to V'=-V$, $\mathrm{d}V\to\mathrm{d}V'=\mathrm{d}V$,从而 $\mathrm{d}V/\mathrm{d}t\to\mathrm{d}V'/\mathrm{d}t'=\mathrm{d}V/\mathrm{d}t=$ 加速度。又如对磁感应强度 B,令 $t\to t'=-t$,由于磁感应强度 B 对时间反演变换具有奇性,即 $B\to B'=-B$,则 $\mathrm{d}B\to\mathrm{d}B'\to\mathrm{d}B$。又如对磁场强度 H,令 $t\to t'=-t$,由于磁场强度 H 时间反演变换具有奇性,即 $H\to H'=-H$,则 $\mathrm{d}H\to\mathrm{d}H'\to\mathrm{d}H$;结合上述讨论可以得到以下结论,即上面所列的,以及所有其他的对时间反演变换具有奇性的物理量 $K=K(t)$(或 $K=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$),该物理量 K 经时间反演变换后得到的反演物理量为 $K'=K(-t)$(或 $K'=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)$),从而有关系 $K(-t)=-K(t)$(或 $K(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)=-K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$),则该物理量 K 经时间反演变换后得到的物理量 K' 在时间正向流逝的方向上每一时刻的微分或偏微分及对时间的导数或偏导数,与原物理量 K 在每一个对称时刻的微分或偏微分及对时间的导数或偏导数相等。即对时间反演变换具有奇性的物理量 K,如果该物理量 K 的微分或偏微分及对时间的导数或偏导数存在并且不等于常数,则该物理量 K 在时间正向流逝的方向上每一时刻的微分或偏微分及对时间的导数或偏导数对时间反演变换具有偶性;即对于 $t\to t'=-t$,如果 $K'=K(-t)=-K(t)$(或 $K'=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)=-K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$),并且 $\mathrm{d}K(t)$(或 $\mathrm{d}K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$)及 $\mathrm{d}K(t)/\mathrm{d}t$(或 $\dfrac{\partial K}{\partial t}$)存在并且不等于常数,则有

$$\mathrm{d}K\to\mathrm{d}K'=\mathrm{d}K(-t)=\mathrm{d}K(t)$$

或

$$\mathrm{d}K\to\mathrm{d}K'=\mathrm{d}K(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)=\mathrm{d}K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$$

$$\mathrm{d}K(t)/\mathrm{d}t\to\mathrm{d}K'(t')/\mathrm{d}t'=\mathrm{d}K(-t)/\mathrm{d}t=\mathrm{d}K(t)/\mathrm{d}t$$

或

$$\frac{\partial K}{\partial t}\to\frac{\partial K'}{\partial t}=\frac{\partial K}{\partial t}$$

据此可以证明,对时间反演变换具有奇性的物理量 $K=K(t)$(或 $K=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$),如果该物理量 K 对时间的 $2n+1$ 阶导数或偏导数存在并且不等于

常数，则该物理量 K 在时间正向流逝的方向上每一时刻对时间的 $2n$ 阶导数或偏导数对时间反演变换具有奇性；并且该物理量 K 在时间正向流逝的方向上每一时刻对时间的 $2n+1$ 阶导数或偏导数对时间反演变换具有偶性。即对于 $t\to t'=-t$，如果 $K'=K(-t)=K(t)$（或 $K'=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,-t)=K(x_1,x_2,\cdots,x_n,t)$），并且 $\mathrm{d}^{2n+1}K(t)/\mathrm{d}t^{2n+1}$（或$\frac{\partial^{2n+1}K}{\partial t^{2n+1}}$）存在并且不等于常数，则有

$$\mathrm{d}^{2n}K(t)/\mathrm{d}t^{2n}\to \mathrm{d}^{2n}K'/\mathrm{d}t'^{2n}=\mathrm{d}^{2n}K(-t)/\mathrm{d}t^{2n}=-\mathrm{d}^{2n}K(t)/\mathrm{d}t^{2n}$$

或

$$\frac{\partial^{2n}K}{\partial t^{2n}}\to\frac{\partial^{2n}K'}{\partial t'^{2n}}=-\frac{\partial^{2n}K}{\partial t^{2n}}$$

$$\mathrm{d}^{2n+1}K(t)/\mathrm{d}t^{2n+1}\to \mathrm{d}^{2n+1}K'/\mathrm{d}t'^{2n+1}=\mathrm{d}^{2n+1}K(-t)/\mathrm{d}t^{2n+1}=\mathrm{d}^{2n+1}K(t)/\mathrm{d}t^{2n+1}$$

或

$$\frac{\partial^{2n+1}K}{\partial t^{2n+1}}\to\frac{\partial^{2n+1}K'}{\partial t'^{2n+1}}=\frac{\partial^{2n+1}K}{\partial t^{2n+1}}$$

其中 $n=1,2,3\cdots$这一结论与通常物理教材经常提到的中“时间反演变换下具有时间的偶次幂的力学量不变号”的结论也完全一致但数学表达形式及意义却是截然不同的。特别的，假定物理量 $K(x,y,z,t)$ 对时间反演变换具有奇性，由于物理量 $K(x,y,z,t)$ 经过时间反演变换得到的反演物理量 $K''=K(x,y,z,-t)$ 已经改变了符号，即对于 $t\to t'=-t$ 有关系 $K(x,y,z,-t)=-K(x,y,z,t)$，从而 $K''=K(x,y,z,-t)$ 在其他三个坐标轴（x 轴、y 轴、z 轴）上也将改变符号，这样物理量 $K(x,y,z,t)$ 对 x,y,z 的一阶及二阶偏导数对时间反演变换具有奇性，即令 $t\to t'=-t$，则有

$$\frac{\partial K(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial x_i}\to\frac{\partial K'(x'_1,x'_2,x'_3,t')}{\partial x'_i}=-\frac{\partial K(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial x_i}$$

$$\frac{\partial K(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial t}\to\frac{\partial K'(x'_1,x'_2,x'_3,t')}{\partial t'}=\frac{\partial K(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial t}$$

及

$$\frac{\partial K^2(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial x_m x_n}\to\frac{\partial K'^2(x'_1,x'_2,x'_3,t')}{\partial x'_m x'_n}=-\frac{\partial K^2(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial x_m x_n}$$

$$\frac{\partial K^2(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial t^2}\to\frac{\partial K'^2(x'_1,x'_2,x'_3,t')}{\partial t'^2}=-\frac{\partial K^2(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial t^2}$$

当 $m=n$ 时有

$$\frac{\partial K^2(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial x_i^2}\to\frac{\partial K'^2(x'_1,x'_2,x'_3,t')}{\partial x'^2_i}=-\frac{\partial K^2(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial x_i^2}$$

其中 i、m、n 的取值为 1,2,3。从而有 $\nabla\cdot K\to\nabla\cdot K'=-\nabla\cdot K$，$\nabla\times K\to\nabla\times K''=-\nabla\times K$，**即对时间反演变换具有奇性的物理量其散度及旋度对时间反演变换也具有奇性**。

通过上述讨论我们可以发现，对任何一个物理量的微分的时间反演变换都不能够仅仅借助简单的数学运算获得，也就是说不能简单地把物理方程中的 t 用 $-t$

代换，而必须同时考虑物理量对时间反演变换的奇偶性及时间的流逝方向不因时间反演变换而发生改变这些因素，特别是对微分方程进行时间反演变换时必须同时考虑方程中的各物理量及其微分对时间反演变换所具有的奇偶性质并据此对相应的物理量及其微分进行时间反演变换，这与当前物理学教材或学术研究中普遍采用的方法是完全不同的。

1.4.2 描述质点运动过程的牛顿动力学方程具有时间反演变换不变性

我们先来看教材中对牛顿动力学方程的时间反演变换不变性的证明的例子。假定质点的质量为 m，在 t_0时刻质点位于初始位置 A 点上，速度为 V_0；在 t_1（显然 $t_1>t_0$）时刻质点到达 B 点，速度为 V_1；显然质点的运动方程 $x(t)$ 满足牛顿第二定律

$$m\frac{\mathrm{d}^2x(t)}{\mathrm{d}t^2}=F(x) \tag{1.16}$$

现在考虑上述质点的运动过程的反演运动的情况，即在 t_0时刻该质点位于初始位置 B 点上，速度为 $-V_1$；在 t_1（显然 $t_1>t_0$）时刻质点到达 A 点，速度为 $-V_0$，假定质点的反演运动的方程为 $x'(t)$。取适当的时间坐标原点使反演运动的时间 $t'=-t$。则存在关系

$$x'(t)=x(-t) \tag{1.17}$$

由于方程(1.16)是对时间 t 的二阶微分，正如刘希明教授在其著作中所说：作用力与时间无关，则该方程具有时间反演不变性。所以质点的时间反演运动也满足该方程，因此也是一种可能的运动。这表明了质点的时间反演变换是其运动过程的逆转，时间反演变换不变性是指运动的可逆性的存在[①]。”

上述证明过程显然缺乏严格性，下面我们对上述证明过程进行详细的分析。显然(1.16)式具有时间反演变换不变性，令 $t\to t'=-t$，则有

$$\mathrm{d}t\to\mathrm{d}t'=d(-t)=\mathrm{d}t$$

$$\mathrm{d}x(t)\to\mathrm{d}x'(t')=\mathrm{d}x'(-t)=-\mathrm{d}x(t)$$

$$\mathrm{d}^2x(t)\to\mathrm{d}^2x'(t')=\mathrm{d}^2x'(-t)=\mathrm{d}^2x(t)$$

$$m\frac{\mathrm{d}^2x(t)}{\mathrm{d}t^2}\to m'\frac{\mathrm{d}^2x'(t')}{\mathrm{d}t'^2}=m\frac{\mathrm{d}^2x(t)}{\mathrm{d}t^2}=F(x)$$

即牛顿动力学方程具有时间反演变换不变性，下面我们对牛顿动力学方程的时间反演变换进行详细讨论。为了不失一般性，令 $F(x)=F$ 为恒定值，则其加速度为恒定值 a。对于质点沿 AB 作匀加速直线运动的情况：令初始时刻 $t=t_0=0$ 时质点的速度 $V_0=0$，$t=t_1$时刻质点的速度为 V_1（如图 1－15 的①中过坐标原点 A(0,

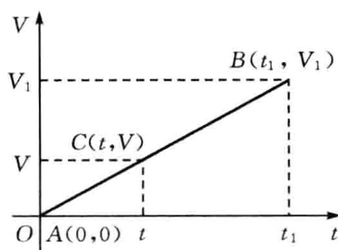
① 刘希明. 高等量子力学[M]. 济南：山东科学技术出版社，2002：230.

0)及点 $B(t_1,V_1)$的直线所示),则质点的速度公式为

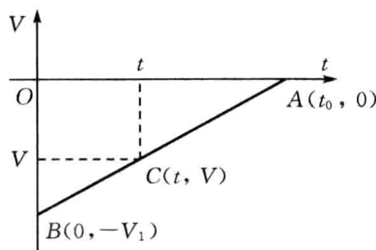
$$V(t)=at$$

质点的运动方程为

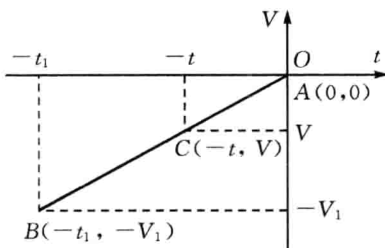
$$x(t)=\frac{1}{2}at^2$$



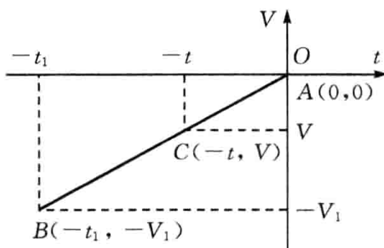
①



②



③



④

图 1-15　质点的匀加速运动的速度—时间关系

因为这里质点沿 AB 的匀加速运动是在时间不断增大的情况下进行的,所以对其进行时间反演变换后质点的运动变为沿 BA 的匀加速运动,而且也是在时间不断增大的情况下进行的,因为对质点的运动方程进行时间反演,仅仅是对方程的每一时刻对应的物理量的数值以时间轴的原点为对称中心所进行的反演,故运动方程的时间反演变换并没有也不可能把时间的进程同时进行反向,从而时间仍然是正向流逝的而没有变为逆向流逝,即运动方程中的时间的取值仍然是从小到大的方式进行。因为时间反演变换仅仅是把方程中的每一个时刻进行反演,即把 $x(t)$反演为 $x(-t)$,由于质点原先的运动是从 $x(t_0)$到 $x(t_1)$,即从 A 到 B,这里 $t_1>t_0$,从而经过时间反演变换后质点的运动变为从 $x(-t_1)$到 $x(-t_0)$,即从 B 到 A,这里 $-t_0>-t_1$,从而质点的运动方向也因此发生了逆转,故相应的速度—时间坐标必须用图 1-15 中的③表达,其质点的速度公式为

$$V(-t)=a(-t)=-V(t)$$

而由于运动方程的时间反演变换使得质点的运动方向已经发生了逆转，由原先的从 A 到 B 的运动变为从 B 到 A 的运动，故运动方程为

$$x(-t)=-\frac{1}{2}at^2$$

对于质点沿 BA 作匀加速直线运动运动（质点沿 AB 轨迹运动的反演运动）的情况：由于其初始时刻 $t=t_0=0$ 时的速度为 $-V_1$，$t=t_1$ 时刻的速度 $V_0=0$（如图 1-15 的②中过点 $B(0,-V_1)$ 及点 $A(t_1,0)$ 的直线所示），则其速度公式为

$$V'(t)=at-V_1$$

质点的运动方程为

$$x'(t)=\frac{1}{2}at^2-V_1t$$

从图 1-15 中可见在时间范围 $(0,t_1)$ 内质点作匀加速直线运动产生的位移均为负值。另外，把图 1-15 的②中的直线 BA 沿 t 轴向左平移 t_1 后的情况如图 1-15 中的④所示，则质点沿 BA 轨迹运动的速度为：

$$V''(t)=-at$$

质点沿 AB 轨迹运动的时间反演变换的运动方程为

$$x''(t)=-\frac{1}{2}at^2$$

从图 1-15 中可见在时间范围 $(-t_1,0)$ 内质点作匀加速直线运动产生的位移均为负值，可见存在以下关系：

$$V''(t)=V(-t)$$
$$x''(t)=x(-t)$$

即如果取适当的时间的坐标原点使反演运动的时间 $t'=-t$，则有以下关系：

$$V''(t)=V(-t)$$
$$x''(t)=x(-t)$$

这也就是说，在质点的匀加速运动的变化过程中对描述质点的运动变化过程的运动方程的时间反演变换得到的新方程，完全等同于描述该质点的运动变化过程的运动方程的运动过程反演变换得到的新方程，即对质点的运动方程的时间反演变换等同于对质点的运动方程的运动过程的反演变换。并且由于运动方程 $x(t)=\frac{1}{2}at^2$ 具有时间反演变换不变性，即令 $t\to t'=-t$，则有

$$x(t)=\frac{1}{2}at^2\to x(t')=x(-t)=\frac{1}{2}at'^2=\frac{1}{2}a(-t)^2$$

从而质点的匀加速运动具有可逆性。即在低速运动的情况下，质点的运动由牛顿

第二定律描述；对于保守的力学系统，由于作用力与时间无关，即公式(1.16)具有时间反演变换不变性，根据物质变化过程的可逆性的定义可知质点的运动是可逆的。

由存在相互作用的质点构成的动力学体系除了可以用牛顿动力学方程描述之外，还可以用以下哈密顿正则方程来描述：

$$\frac{\mathrm{d}q_i}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial H}{\partial p_i} \tag{1.18}$$

$$\frac{\mathrm{d}p_i}{\mathrm{d}t}=-\frac{\partial H}{\partial q_i} \tag{1.19}$$

其中 $i=1,2,3,\cdots,n$；q_i 为质点的广义坐标，p_i 为质点的广义动量，$H=\sum_i \frac{p_i^2}{2m_i}+U(q_1,\cdots,q_{3n})$ 为动力学系统的哈密顿量。对方程(1.18)及(1.19)，显然 $\frac{\mathrm{d}q_i}{\mathrm{d}t}$ 与 $\frac{\partial H}{\partial p_i}$ 为广义速度，$\frac{\mathrm{d}p_i}{\mathrm{d}t}$ 与 $\frac{\partial H}{\partial q_i}$ 为广义作用力，这样 $\mathrm{d}q_i$ 必须被看做为广义位移的微分。令 $t\rightarrow t'=-t$，则有

$$\mathrm{d}t\rightarrow \mathrm{d}t'=\mathrm{d}(-t)=\mathrm{d}t$$

由于质点的广义坐标 q_i 是对时间反演变换具有偶性，故在时间的正方向上其微分对时间反演变换具有奇性，从而有

$$\mathrm{d}q_i\rightarrow \mathrm{d}q_i'=-\mathrm{d}q_i$$

根据上面获得的结论，则在方程(1.18)的左边有

$$\frac{\mathrm{d}q_i}{\mathrm{d}t}\rightarrow\frac{\mathrm{d}q'_i}{\mathrm{d}t'}=\frac{-\mathrm{d}q_i}{\mathrm{d}t}=-\frac{\mathrm{d}q_i}{\mathrm{d}t}$$

另外，由于时间反演变换导致质点的运动的反向，从而导致质点的速度及动量变号，令 $t\rightarrow t'=-t$，则有

$$p_i\rightarrow p_i'=-p_i, H\rightarrow H'=H$$

由于质点的广义动量 p_i 对时间反演变换具有奇性，故在时间的正方向上其微分对时间反演变换具有偶性，从而有

$$\mathrm{d}p_i\rightarrow \mathrm{d}p_i'=\mathrm{d}p_i$$

由于质点的哈密顿量 H 对时间反演变换具有偶性，故在时间的正方向上其微分对时间反演变换具有奇性，即有

$$\mathrm{d}H\rightarrow \mathrm{d}H'=-\mathrm{d}H$$

从而在方程的右边

$$\frac{\partial H}{\partial p_i}\rightarrow\frac{\partial H'}{\partial p'_i}=\frac{-\partial H}{\partial p_i}=-\frac{\partial H}{\partial p_i}$$

所以方程(1.18)具有时间反演变换不变性。对于方程(1.19),令 $t \to t' = -t$,则在方程的左边有

$$\frac{\mathrm{d}p_i}{\mathrm{d}t} \to \frac{\mathrm{d}p'_i}{\mathrm{d}t'} = \frac{\mathrm{d}p_i}{\mathrm{d}t}$$

在方程的右边有

$$-\frac{\partial H}{\partial q_i} \to -\frac{\partial H'}{\partial q'_i} = -\frac{-\partial H}{-\partial q_i} = -\frac{\partial H}{\partial q_i}$$

所以方程(1.19)具有时间反演变换不变性,即存在相互作用的质点构成的动力学体系的变化过程具有时间反演变换不变性。

由存在相互作用的质点构成的动力学体系还可以用拉格朗日动力学方程描述:

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial(\mathrm{d}q_i/\mathrm{d}t)}\right) = 0 \tag{1.20}$$

其中 $i=1,2,\cdots,n$;$L[q(t),\mathrm{d}q/\mathrm{d}t] = T(\mathrm{d}\,q_1/\mathrm{d}t, \wedge, \mathrm{d}\,q_{3n}/\mathrm{d}t) - V(q_1, \wedge, q_{3n})$ 是拉格朗日函数。对于方程(1.20),显然$\frac{\partial L}{\partial q_i}$为广义作用力,$\frac{\mathrm{d}\,q_i}{\mathrm{d}t}$为广义速度,这样 $\mathrm{d}q_i$ 即是广义位移。令 $t \to t' = -t$,则有

$$\mathrm{d}t \to \mathrm{d}t' = \mathrm{d}(-t) = \mathrm{d}t$$

$$\mathrm{d}L \to \mathrm{d}L' = -\mathrm{d}L$$

故

$$\mathrm{d}q_i \to \mathrm{d}q_i' = -\mathrm{d}q_i$$

则方程的左边有

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial(\mathrm{d}q_i/\mathrm{d}t)}\right) &\to \frac{\partial L'}{\partial q'_i} - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t'}\left(\frac{\partial L'}{\partial(\mathrm{d}q'_i/\mathrm{d}t')}\right) \\ &= \frac{-\partial L}{-\partial q_i} - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{-\partial L}{\partial(-\mathrm{d}q_i/\mathrm{d}t)}\right) \\ &= \frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial(\mathrm{d}\,q_i/\mathrm{d}t)}\right)\end{aligned}$$

显然方程(1.20)具有时间反演变换不变性,也就是说由经典力学描述的物质的变化过程具有时间反演变换不变性。

1.4.3 描述基本电磁现象的麦克斯韦方程具有时间反演变换不变性

电磁学的理论体系主要由麦克斯韦方程组构成,真空中的麦克斯韦方程组是:

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{1.21}$$

$$\nabla \times E = -\frac{1}{C}\frac{\partial B}{\partial t} \tag{1.22}$$

$$\nabla \cdot E = 4\pi\rho \tag{1.23}$$

$$\nabla\times B=\frac{1}{C}\frac{\partial E}{\partial t}+\frac{4\pi}{C}J \tag{1.24}$$

其中$\nabla=\frac{\partial}{\partial x}i+\frac{\partial}{\partial y}j+\frac{\partial}{\partial z}k$ 为梯度算符，E 为电场强度，B 为磁感应强度，$J=\rho V$ 为电流密度，C 为光速。

另外，带电粒子在电磁场中的运动过程所受到的电磁力即洛伦兹力的作用的表达式为

$$F=eE+\frac{e}{C}V\times H \tag{1.25}$$

式中 e 是带电粒子所带的电荷量，V 是带电粒子的运动速度，E 为带电粒子所处环境的电场强度，H 是带电粒子所处环境的磁场强度，C 为光速。

对于方程(1.21)及(1.23)，令 $t\to t'=-t$，由于时间反演变换会导致电荷的运动方向发生逆转，从而有

$$E\to E'=E$$

$$B\to B'=-B$$

$$\nabla\cdot E\to\nabla'\cdot E'=\nabla\cdot E$$

$$\nabla\cdot B\to\nabla'\cdot B'=-\nabla\cdot B$$

$$\rho\to\rho'=\rho$$

其中$\nabla'=\frac{\partial}{\partial x'}i+\frac{\partial}{\partial y'}j+\frac{\partial}{\partial z'}k$，这样方程(1.21)及(1.23)具有时间反演变换不变性；另外，方程(1.22)及方程(1.24)可以分别表达为

$$\nabla\times E=-\frac{\partial B}{\partial Ct},\ \nabla\times B=\frac{\partial E}{\partial Ct}+4\pi\rho\frac{V}{C}$$

对于方程(1.22)及(1.24)，令 $t\to t'=-t$，则有

$$\mathrm{d}t\to\mathrm{d}t'=\mathrm{d}(-t)=\mathrm{d}t$$

由于磁感应强度 B 对时间反演变换具有奇性，故在时间的正方向上 B 的微分对时间反演变换具有偶性，即有

$$\mathrm{d}B\to\mathrm{d}B'\to\mathrm{d}B$$

故

$$\frac{\partial B}{\partial Ct}\to\frac{\partial B'}{\partial C't'}=\frac{\partial B}{\partial Ct}$$

又$\frac{V}{C}\to\frac{V'}{C'}=\frac{(-V)}{C}=-\frac{V}{C}$，另外 E 对时间反演变换具有偶性，故 E 在时间的正方向上的微分对时间反演变换具有奇性，即有

$$\mathrm{d}E\to\mathrm{d}E'=-\mathrm{d}E$$

$$\frac{\partial E}{\partial Ct}\to\frac{\partial E'}{\partial C't'}=\frac{-\partial E}{\partial Ct}=-\frac{\partial E}{\partial Ct}$$

$$\nabla \times E \to \nabla ' \times E' = \nabla \times E$$
$$\nabla \times B \to \nabla ' \times B' = - \nabla \times B$$
$$J \to J' = - J$$

这样方程(1.22)及(1.24)具有时间反演变换不变性。综合上述结论可以得到真空中的麦克斯韦方程组具有时间反演变换不变性。另外,对于方程(1.25),令 $t \to t' = -t$,由于电荷的运动方向会因时间反演变换而发生改变,则有

$$E \to E' = E$$
$$H \to H' = - H$$
$$V \to V' = - V$$
$$e \to e' = e$$

从而有 $F \to F' = F$,即洛伦兹力具有时间反演变换不变性。显然,这里所进行的时间反演变换的操作与教科书中介绍的方法有明显的不同。

另外,由真空中的麦克斯韦电磁场方程可以推导出在真空中传播的电磁场的波动方程为:

$$\nabla^2 \Psi(r,t) - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \Psi(r,t)}{\partial t^2} = - \Xi(r,t) \tag{1.26}$$

显然该方程有两个解。由于波动方程(1.26)是由麦克斯韦电磁场方程及其规范变换得到的,而麦克斯韦电磁场方程及规范变换具有时间反演变换不变性,所以波动方程(1.26)具有时间反演变换不变性,这一点也可以结合波动方程(1.26)的意义并通过对方程(1.26)进行时间反演变换进行证明。通过解(1.26)偏微分方程可得波动方程的其中一个解是:

$$\Psi_{+}(r,t) = \int \frac{\Xi\left(r', t - \frac{|r-r'|}{c}\right)}{4\pi |r-r'|} \mathrm{d}V$$

这里 $\Xi(r,t)$ 是波源,$\mathrm{d}V$ 是体积微元,c 是光在真空中的速度。这个解描述了空间中的 r 点及 t 时刻的场值与空间中的 r' 点及 $t' = t - \frac{|r-r'|}{c}$ 时刻的源值之间的因果关系,表明电磁波波源的信号以速度 c 从点 r' 传播到点 r。显然,波传播到 r 点这一结果发生的时刻比电磁波的源在 r' 点产生这一原因出现的时刻推迟了一段时间 $\frac{|r-r'|}{c}$,这即是将解 $\Psi_{+}(r,t)$ 称为波动方程(1.26)的推迟解的原因;波动方程(1.26)的另一个解是:

$$\Psi_{-}(r,t) = \int \frac{\Xi\left(r', t + \frac{|r-r'|}{c}\right)}{4\pi |r-r'|} \mathrm{d}V$$

这个解描述了空间中 r 点及 t 时刻的场值与空间中 r' 点及 $t'=t+\frac{|r-r'|}{c}$ 时刻的"源"值之间的因果关系。在此显然有 $t'>t$，意味着场信号以速度 c 从场所在的空间中 r 点传播到"源"所在的空间中 r' 点，在这一因果联系中波传播到电磁波的源 r' 点这一"结果"发生的时刻比电磁波的场值在 r 产生这一"原因"出现的时刻推迟了一段时间 $\frac{|r-r'|}{c}$。表明存在时间较早的场与出现时间较晚的"源"通过波相联系，这里与推迟波的情况完全不同的是场为原因、"源"是结果，"源"在这里成为了场的"吸收壑"而不是辐射源。由于在这一因果联系中场在先，$\Psi_-(r,t)$ 因而被称为波动方程(1.26)的超前解[①]。在此，由于我们可以通过以任一时刻 t 为对称轴的对称变换将推迟波 $\Psi_+(r,t)$ 变换为超前波 $\Psi_-(r,t)$，如图 1-16 所示，因此这里提到的推迟波 $\Psi_+(r,t)$ 的传播过程是超前波 $\Psi_-(r,t)$ 的传播过程的逆过程。同样

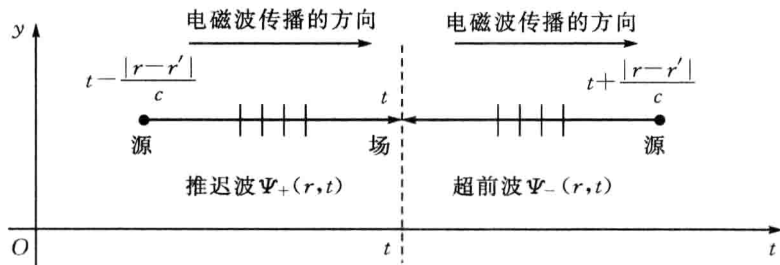


图 1-16　推迟波与超前波之间的"对称"关系示意图

的，我们还可以将推迟波进行时间反演变换而得到与推迟波的传播方向相反的波，显然由此得到的同样是一列波，而这列波就是从场传播到"源"的所谓超前波。由于超前波的传播过程是推迟波的传播过程的逆过程，因此，超前波并非如 20 世纪 40 年代由美国物理学家约翰·惠勒与理查德·费因曼共同提出的、由美国天体物理学家布鲁斯·帕特里季试图通过实验验证的在逆向流逝的时间中从现在向过去由"源"到场传播的波，而是在正向流逝的时间中由场到"源"传播的所谓超前波，这是在正向流逝的时间中由源到场传播的推迟波的逆过程，由于从麦克斯韦电磁场方程推导出的电磁场的波动方程具有时间反演变换不变性，因此该方程具有时间反演变换不变性(这一点可以很容易地进行证明)，而且可以同时用于描述推迟波与超前波这两个互逆的过程，也可以说由于麦克斯韦电磁场方程具有时间反演变换不变性，从而对其任何一个解(如"推迟波")进行时间反演变换后得到的(如"超

① 张启仁. 经典场论[M]. 北京：科学出版社，2003：135.

前波”)仍然是该方程的一个解。实际上，超前波这一概念是不恰当的，很容易使人理解为在逆向流逝的时间中从现在向过去传播的波。如果我们将从波源向波场传播的波（即推迟波）定义为辐射波，那么从波场向波源传播的波（即超前波）应该定义为吸收波。

1.4.4 描述微观物质变化过程的基本物理方程具有时间反演变换不变性

描述微观物质低速运动的变化过程的物理方程是薛定谔方程，薛定谔方程如下：

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(r,t)=\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+U(r,t)\right]\psi(r,t) \tag{1.27}$$

其中 $\psi(r,t)$ 为波函数，势能 $U(r,t)$ 为实函数。

由于波函数 $\psi(r,t)$ 是复函数，因此波函数 $\psi(r,t)$ 对于时间反演变换既非奇性也非偶性，这也就是说不能使用直接对方程进行时间反演变换的方法。我们知道，动量为 p、能量（即动能）为 E 的自由粒子的运动状态可以用平面波的波函数 $\psi(r,t)=A\,e^{i(p\cdot r-E\cdot t)/\hbar}$ 描述，对波函数 $\psi(r,t)$，令 $t\to t'=-t$，则有

$$\psi(r,t)\to\psi'(r',t')=\psi'(r,-t)=A\,e^{-i(p\cdot r-E\cdot t)/\hbar}$$

即有

$$\psi'(r,-t)=A\,e^{-i(p\cdot r-E\cdot t)/\hbar} \tag{1.28}$$

将等式(1.28)两边对时间 t 求一阶偏导数，则有

$$\frac{\partial\psi'(r,-t)}{\partial t}=\frac{i}{\hbar}E\psi'(r,-t)$$

也即

$$-i\hbar\frac{\partial\psi'(r,-t)}{\partial t}=E\psi'(r,-t) \tag{1.29}$$

将等式(1.28)两边分别对空间坐标 x、y、z 求二阶偏导数，可得

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x}+\frac{\partial^2}{\partial y}+\frac{\partial^2}{\partial z}\right)\psi'(r,-t)=-\frac{p^2}{\hbar^2}\psi'(r,-t)$$

即

$$\nabla^2\psi'(r,-t)=-\frac{p^2}{\hbar^2}\psi'(r,-t) \tag{1.30}$$

其中 $\nabla^2\equiv\left(\frac{\partial^2}{\partial x}+\frac{\partial^2}{\partial y}+\frac{\partial^2}{\partial z}\right)$。由于自由粒子的能量（动能）$E$ 与其动量 p 之间存在关系 $E=\frac{p^2}{2m}$，这样(1.30)又可以表达为：

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi'(r,-t)=E\psi'(r,-t) \tag{1.31}$$

由式(1.29)和式(1.31)得：

$$i\hbar\frac{\partial\psi'(r,-t)}{\partial t}=\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi'(r,-t) \tag{1.32}$$

一般对于粒子处于力场的情况，粒子的能量 E 与动量 p 之间的关系为 $E=\frac{p^2}{2m}+U(r)$，这样公式(1.32)又可以改写为

$$i\hbar\frac{\partial\psi'(r,-t)}{\partial t}=\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi'(r,-t)-U(r)\,\psi'(r,-t)$$

即

$$-i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi'(r,-t)=\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+U(r,-t)\right]\psi'(r,t) \tag{1.32a}$$

从而波函数 $\psi(r,t)$ 与其时间反演函数 $\psi'(r,-t)$ 满足不同的波动方程。对方程(1.32a)中的波函数 $\psi'(r,-t)$ 取共轭函数，则有

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi'^{*}(r,-t)=\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+U(r,t)\right]\psi'^{*}(r,-t) \tag{1.33}$$

可见，薛定谔方程的解 $\psi(r,t)$ 与其时间反演变换的共轭解 $\psi'^{*}(r,-t)$ 满足相同的方程。即对于薛定谔方程的解 $\psi(r,t)$，其时间反演变换是波函数 $\psi'(r,-t)$ 的复共轭函数 $\psi'^{*}(r,-t)$，从而描述微观粒子的薛定谔方程具有时间反演变换不变性。我们知道，波函数 $\psi'(r,-t)$ 的强度 $|\psi'(r,-t)|^2=\psi'(r,-t)\cdot\psi'^{*}(r,-t)$ 表示波函数为 $\psi'(r,t)$ 的粒子在空间位置 r 上及时刻 t 出现的几率，$\psi'(r,-t)$ 的共轭复函数 $\psi'^{*}(r,-t)$ 的强度 $|\psi'_{*}(r,-t)|^2=\psi'_{*}(r,-t)\cdot\psi'(r,-t)$ 表示波函数为 $\psi'^{*}(r,-t)$ 的粒子在空间位置 r 上及时刻 t 出现的几率，这就意味着如果从粒子的几率分布角度看波函数 $\psi'(r,-t)$ 与波函数 $\psi'^{*}(r,-t)$ 是无法被区分的，即二者对描述粒子的几率在波函数所在空间中几率分布是完全等效的。由于波函数 $\psi(r,t)$ 的时间反演函数是波函数 $\psi'(r,-t)$，由此可以理解为波函数 $\psi(r,t)$ 的时间反演函数同样可以是波函数 $\psi'^{*}(r,-t)$。

用同样的方法可以证明，描述自旋为0的粒子的相对论性量子力学方程(即Klein-Gordon方程)与描述自旋为1/2的粒子的相对论性量子力学方程(即Dirac方程)也具有时间反演变换不变性。

描述微观粒子运动规律的薛定谔方程关于时间的对称性除了上面的证明方法外，我们还可以用下面汤甦野教授在其著作中采用的方法进行证明(注：为保持叙述上的前后一致性，我们将涉及的方程采用了本书中的编号)。

“引入记号分别表示波函数的实部和虚部：

$$A(r,t)=C\cos[(pr-Et)/\hbar] \tag{1.34}$$

$$B(r,t)=C\sin[(pr-Et)/\hbar] \tag{1.35}$$

可以将薛定谔波动方程表达为实函数的联立方程组，其中能量方程

$$\hbar\frac{\partial}{\partial t}A(r,t)=EB(r,t) \tag{1.36}$$

$$\hbar\frac{\partial}{\partial t}B(r,t)=-EA(r,t) \tag{1.37}$$

动量方程

$$\begin{cases} \hbar\nabla A(r,t)=-pB(r,t) & (1.38) \\ \hbar\nabla B(r,t)=pA(r,t) & (1.39) \end{cases}$$

以及在势能力场中粒子的总能与动能和势能的关系：

$$E=p^2/(2m)+U(r)$$

即薛定谔方程是以复函数运算的数理逻辑表示上述五个实函数方程的联立方程组……得到

$$\begin{cases} \hbar\dfrac{\partial}{\partial t}A(r,t)=\left[-\dfrac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+U(r)\right]B(r,t) & (1.40) \\ \hbar\dfrac{\partial}{\partial t}B(r,t)=-\left[-\dfrac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+U(r)\right]A(r,t) & (1.41) \end{cases}$$

这样，我们就将复函数形式的薛定谔方程表达为两个联立实函数方程，并以实函数形式确立了平面波 A 和 B 之间的联系，结果说明波动方程并非“必须表达成复数形式”。在实数方程组形式中，波函数的意义显示出真实波动的交替激发性质。这一结果说明量子力学除了德布罗意-薛定谔表象和海森堡表象之外，还可以描述为真实波动的实函数表象。联立实函数(1.40)和(1.41)说明了两种波动的相互转换关系，“两个”相互关联的平面波相差相位①。”

这就是复函数形式的薛定谔方程用实函数联立方程组的表达式，其中 $A(r,t)$ 及 $B(r,t)$ 可以理解为是两个相互关联的相位差为 90°角的平面波。显然复函数形式的薛定谔方程与该实函数联立方程组对微观粒子的波动性的描述是完全等效的。

对平面波 $A(r,t)$ 进行时间反演变换，令 $t\to t'=-t$，则有

$$\begin{aligned} A(r,t)\to A'(r',t') &= A(r,-t) \\ &= C\cos[(-pr-E(-t))/\hbar] \\ &= C\cos[-(pr-Et)/\hbar] \\ &= C\cos[(pr-Et)/\hbar] \\ &= A(r,t) \end{aligned}$$

即 $A(r,t)$ 对时间反演变换具有偶性；对平面波 $B(r,t)$ 进行时间反演变换，令 $t\to t'=-t$，则有

$$\begin{aligned} B(r,t)\to B'(r',t') &= B(r,-t) \\ &= C\sin[(-pr-E(-t))/\hbar] \\ &= C\sin[-(pr-Et)/\hbar] \end{aligned}$$

① 汤甦野．熵：一个世纪之谜的解析[M]．2 版．合肥：中国科技大学出版社，2008：176—177．

$$= -C\sin[(pr - Et)/\hbar]$$
$$= -B(r,t)$$

即 $B(r,t)$ 对时间反演变换具有奇性。

对方程(1.40)，令 $t \to t' = -t$，则有

$$dt \to dt' = d(-t) = dt$$

由于 $A(r,t)$ 对时间反演变换具有偶性，则方程的左边有

$$\hbar \frac{\partial}{\partial t}A(r,t) \to \hbar \frac{\partial}{\partial t'}A'(r',t') = \hbar \frac{\partial}{\partial t}A'(r,-t) = -\hbar \frac{\partial}{\partial t}A(r,t)$$

方程的右边有

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + U(r)\right]B(r,t) \to \left[-\frac{\hbar^2}{2m'}\nabla'^2 + U'(r')\right]B'(r',t')$$
$$= \left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + U(r)\right]B'(r,-t)$$
$$= -\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + U(r)\right]B(r,t)$$

由此可得方程(1.40)具有时间反演变换不变性。

对方程(1.41)，令 $t \to t' = -t$，由于 $B(r,t)$ 对时间反演变换具有奇性，则方程的左边有

$$\hbar \frac{\partial}{\partial t}B(r,t) \to \hbar \frac{\partial}{\partial t'}B'(r',t') = \hbar \frac{\partial}{\partial t}B'(r,-t) = \hbar \frac{\partial}{\partial t}B(r,t)$$

而相应的方程的右边有

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + U(r)\right]A(r,t) \to \left[-\frac{\hbar^2}{2m'}\nabla'^2 + U'(r')\right]A'(r',t')$$
$$= \left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + U(r)\right]A'(r,-t)$$
$$= \left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + U(r)\right]A(r,t)$$

由此可得方程(1.41)具有时间反演变换不变性。即与复函数形式的薛定谔方程完全等效的联立实函数方程具有时间反演变换不变性，从而复函数形式的薛定谔方程同样具有时间反演变换不变性。

上面用实函数的联立方程组的形式表达复函数波动方程的方法可以推广到相对论形式的波动方程中。汤甦野教授在其著作中用同样的方法得到了实函数形式的狄拉克波动方程。

“例如，对于 Dirac 方程：

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t}\psi(r,t) = (-i\hbar C\alpha \cdot \nabla + \beta m_0 C^2)\psi(r,t)$$

可以得到联立实函数方程

$$\begin{cases} \hbar \dfrac{\partial}{\partial t}A(r,t) = (-\hbar C\alpha \cdot \nabla + \beta m_0 C^2)B(r,t) & (1.42) \\ \hbar \dfrac{\partial}{\partial t}B(r,t) = -(-\hbar C\alpha \cdot \nabla + \beta m_0 C^2)A(r,t) & (1.43) \end{cases}$$

式中，α 和 β 为线性化四行列矩阵①。”

显然，该实函数联立方程组与复函数形式的 Dirac 方程完全等效。

应用以上类似的方法可以证明，与复函数波动方程完全等效的实函数的联立方程组形式表达的自旋为 0 及 1/2 的粒子的相对论性量子力学方程组具有时间反演变换不变性，由此证明在复函数形式的 Klein-Gordon 方程及 Dirac 方程同样具有时间反演变换不变性。

由于多数量子力学的问题都可归结为薛定谔方程的求解，即归结为求解方程中的波函数 $\boldsymbol{\Psi}$，并且波函数 $\boldsymbol{\Psi}$ 可以用于描述粒子在波函数所在空间中的几率分布；同样的，借助波函数 $\boldsymbol{\Psi}$ 还可以通过使用某种力学量算符的方法计算出相应力学量的各本征值的几率，可见力学量算符在量子力学中是非常重要的概念。而为了便于对量子力学中各种力学量算符的时间反演变换的研究，物理学家引入了与之对应的时间反演算符 $\boldsymbol{T}$ 的概念，如在量子力学中对粒子的坐标、动量以及轨道角动量对应的算符 $\boldsymbol{x}$、$\boldsymbol{P}$、$\boldsymbol{L}$ 的 T 操作分别为 $\boldsymbol{x}'=\boldsymbol{TxT}^{-1}=\boldsymbol{x}$，$\boldsymbol{P}'=\boldsymbol{TPT}^{-1}=-\boldsymbol{P}$，$\boldsymbol{L}'=\boldsymbol{TLT}^{-1}=-\boldsymbol{L}$ 等。其实时间反演算符 $\boldsymbol{T}$ 是对量子系统中的力学量算符的时间反演变换的整体性操作，结果与上面我们所进行的讨论是完全一致的，我们在此不再进行详尽的讨论。除以上所讨论的描述基本的物质变化过程的物理方程具有时间反演变换不变性之外，同样还可以证明狭义及广义相对论中描述基本的物质变化过程的物理方程同样具有时间反演变换不变性，在此不再细述。

1.4.5 热力学系统的变化过程导致时间反演变换的对称性破缺

描述一维热导体的热传导过程的傅里叶偏微分方程为

$$\frac{\partial T(X,t)}{\partial t} = -\lambda \frac{\partial^2 T(X,t)}{\partial X^2} \tag{1.44}$$

式中，函数 $T(X,t)$ 为 t 时刻在金属棒 X 处的温度（也称热传导函数），λ 为热传导系数，该系数在一般条件下恒为正值。

对方程(1.44)进行的时间反演变换：在公式(1.44)中，令 $t\to t'=-t$，即时间本身对时间反演变换具有奇性，从而时间的微分对时间反演变换具有偶性，即有

$$\mathrm{d}t \to \mathrm{d}t' = \mathrm{d}(-t) = \mathrm{d}t$$

① 汤甦野. 熵：一个世纪之谜的解析[M]. 2 版. 合肥：中国科技大学出版社，2008：177—178.

假定热传导函数 $T(X,t)$对时间反演变换具有偶性，即有

$$T(X,t)\rightarrow T'(X',t')=T'(X,(-t))=T(X,t)$$

从而函数 $T(X,t)$在其时间的正方向上的微分及关于时间的偏微分对时间反演变换具有奇性，即有

$$\mathrm{d}T(X,t)\rightarrow \mathrm{d}T'(X',t')=\mathrm{d}T'(X,(-t))=-\mathrm{d}T(X,t)$$

则等式(1.44)的左边有

$$\frac{\partial T(X,t)}{\partial t}\rightarrow\frac{\partial T'(X',t')}{\partial t'}=\frac{\partial T'(X,(-t))}{\partial t}=\frac{-\partial T(X,t)}{\partial t}=-\frac{\partial T(X,t)}{\partial t}$$

另外，由于 $T(X,t)$对时间反演变换具有偶性，根据 $T(X,t)$对 X 的偏微分、偏导数的意义及上面的结论，则有

$$\frac{\partial^2 T(X,t)}{\partial X^2}\rightarrow\frac{\partial^2 T'(X',t')}{\partial X'^2}=\frac{\partial^2 T'(X,(-t))}{\partial X'^2}=\frac{\partial^2 T(X,t)}{\partial X^2}$$

则等式(1.44)的右边有

$$-\lambda\frac{\partial^2 T(X,t)}{\partial X^2}\rightarrow-\lambda\frac{\partial^2 T'(X',t')}{\partial X'^2}=-\lambda\frac{\partial^2 T'(X,(-t))}{\partial X'^2}=-\lambda\frac{\partial^2 T(X,t)}{\partial X^2}$$

所以有

$$\frac{\partial T(X,t)}{\partial t}=\lambda\frac{\partial^2 T(X,t)}{\partial X^2}\tag{1.44a}$$

显然方程(1.44)和(1.44a)是完全不同的方程，因此两者具有不同的解。由此得到一维热导体的热传导过程的傅里叶方程不具有时间反演变换不变性；另外，如果假定热传导函数 $T(X,t)$对时间反演变换具有奇性，同样可以证明一维热导体的热传导过程的傅里叶方程不具有时间反演变换不变性。这就是说对于任意的一维导体的热传导函数 $T(X,t)$，其热传导过程的傅里叶方程不具有时间反演变换不变性，即是关于时间反演变换对称破缺的。根据物质变化过程的可逆性定义可知热传导过程具有不可逆性，也就是说热传导过程本身具有单向性，我们称之为“变化过程的箭头”。显然这里并没有产生出人们通常所谓的“时间箭头”，因为这里虽然进行了时间反演变换，即 $t\rightarrow t'=-t$，但仍然有 $\mathrm{d}t\rightarrow \mathrm{d}t'=\mathrm{d}(-t)=\mathrm{d}t$，即热传导变化过程的逆过程所在的时间段中时间流逝的方向与热传导原变化过程所在的时间段中时间流逝的方向完全相同(即在逆过程中仍然具有与原过程完全一样的时间流逝的方向)，并没有因为时间反演变换而产生出新的时间流逝的方向，也就是说这里并没有所谓新的“时间箭头”产生。这里的“变化过程箭头”表明，对于热导体的初始温度不均匀分布的状态，随着时间的推移，将趋于温度均匀分布的状态。

又如对于一个孤立的热力学系统，热力学第二定律告诉我们热力学系统内的任何变化都不可能导致系统总熵值的减小，也就是说系统的熵总是随时间的增大

而增加的，即 $dS \geqslant 0$（或者 $\frac{dS}{dt} \geqslant 0$），其中等号成立的条件是变化过程具有可逆性（或者熵 S 等于常数），而在一般情况下由于系统的熵是单调增加的从而系统的变化过程具有不可逆性，这一点可以借助对热力学系统的态函数熵 S 的时间反演变换加以说明。假定在下面的讨论中该热力学系统的变化过程具有可逆性，热力学系统的熵的变化如图 1-17 中的曲线 $S=S(t)$ 所示，在 t_1 时刻热力学系统的态函数熵的值为 S_1，而在 t_2 时刻系统的态函数熵的值为 S_2。显然，随着时间的推移，系统的态函数熵是单调递增的，即 $\Delta t = t_2 - t_1 > 0$，$\Delta S = S_2 - S_1 > 0$，令 $\Delta t \to 0$，则 $\Delta S \to dS > 0$。由于在系统的变化过程中，系统的态函数熵总是随时间的增大而增加的，所以该变化过程的逆过程则随时间的增大其态函数熵必定随时间的增大而减小的。现在对态函数熵的变化过程 $S=S(t)$ 进行时间反演变换，则得到图 1-17 中所示的以曲线 $S'=S'(t)$ 表达的态函数熵的变化过程，该变化过程是原变化过程 $S=S(t)$ 的逆过程，在 $-t_1$ 时刻熵的值为 $S_1{}'$，而在 $-t_2$ 时刻熵的值为 $S_2{}'$，显然 $S_1 = S_1{}'$，$S_2 = S_2{}'$，这样，熵对时间反演变换具有偶性。对变化过程的逆过程而言意味着随时间的流逝，系统的熵是单调递减的，即对于 $-t_1$ 及 $-t_2$ 两时刻之间的时间段 $\Delta t = -t_1 - (-t_2) = t_2 - t_1 > 0$，对应的熵的差值 $\Delta S' = S_1{}' - S_2{}' = S_1 - S_2 = -\Delta S < 0$，令 $\Delta t \to 0$，则 $\Delta t = dt$，$\Delta S' \to dS'$，$dS' = -dS < 0$，也即由于态函数熵对时间反演变换具有偶性，从而其微分对时间反演变换具有奇性。令 $t \to t' = -t$，则有

$$dt \to dt' = d(-t) = dt$$

$$\frac{dS}{dt} \to \frac{dS'}{dt'} = \frac{-dS}{dt} = -\frac{dS}{dt} < 0$$

即热力学系统变化过程中的态函数熵随时间的变化率经过时间反演变换由原变化过程的正值变为负值，也就是说热力学系统的变化过程的逆过程的态函数熵随时间的变化率小于 0，而这显然是违反热力学第二定律的，这也就意味着热力学系统的变化过程的逆过程是不可能自发发生的，从而热力学系统的态函数熵的时间反演变换不变性不成立，即时间反演变换导致热力学变化过程的对称破缺。

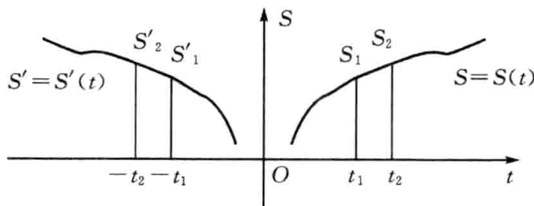


图 1-17 孤立的热力学系统熵的变化过程及其时间反演变换

在统计物理学中,H 函数是表征热力学系统的变化过程的非常重要的一个函数,其表达式为

$$H=\int f\ln f\mathrm{d}v \tag{1.45}$$

式中,v 是单原子分子的运动速度,f 是构成系统的单原子分子的速度分布函数。则 H 函数随时间的变化按以下方式进行

$$\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}=\int(1+\ln f)\frac{\partial f}{\partial t}\mathrm{d}v \tag{1.46}$$

据此可得出结论:$\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}\leqslant 0$,即 H 函数随时间的变化率是单调下降的,其中等号成立的条件是变化过程具有可逆性,或者 H 函数为常数。

现在我们讨论$\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}$的时间反演变换,在讨论过程中假定相应的变化过程具有不可逆性,即$\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}<0$。对式(1.45),令 $t\to t'=-t$,则有

$$\mathrm{d}v\to\mathrm{d}v'=\mathrm{d}v$$

故
$$H=\int f\ln f\mathrm{d}v\to\int f'\ln f'\mathrm{d}v'=\int f\ln f\mathrm{d}v=H$$

即 H 函数对时间的反演变换具有偶性,从而 H 函数的微分 $\mathrm{d}H$ 对时间反演变换具有奇性,即对 $t\to t'=-t$,则有

$$\mathrm{d}t\to\mathrm{d}t'=\mathrm{d}(-t)=\mathrm{d}t$$

及
$$\mathrm{d}H\to\mathrm{d}H'=-\mathrm{d}H$$

以及
$$\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}\to\frac{\mathrm{d}H'}{\mathrm{d}t'}=\frac{-\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}=-\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}$$

所以有
$$\frac{\mathrm{d}H'}{\mathrm{d}t'}=-\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}>0$$

即在该变化过程的逆过程中$\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}$单调上升,而这一结论与$\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}<0$是不相符的,故相应的热力学系统的变化过程的逆过程是不可能发生的。另外我们知道,H 函数与热力学系统的熵 S 成正比关系,即 $S=-kH$,其中 k 是玻耳兹曼常数,这里的结论与上面关于孤立的热力学系统的熵随时间的变化率$\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t}$的结论是完全一致的。

我们前面介绍过描述质点运动的牛顿力学的基本方程具有时间反演变换不变性,其中显然隐含了一个假设:质点在运动过程中不受耗散力即摩擦力的影响。这种情况显然是质点运动的理想状态,而实际情况则是任何物体在运动过程中都会

受到摩擦力的作用，那么对物体在运动过程中受到摩擦力作用的情况，相应的时间反演变换又将如何呢？下面我们就通过阻尼摆的例子进行简单讨论。我们知道，单摆由摆绳和摆锤构成，理想的单摆在摆动过程中被假定不受耗散力的作用（即不受空气阻力影响），从而摆锤在摆动过程中其摆动幅度及摆动周期不会有任何衰减。而实际上所有的单摆在摆动过程中都会受到空气的阻尼作用，从而摆锤的摆动幅度会越来越小直至最终停止摆动，即所有实际的单摆都可称做阻尼摆，而阻尼摆的运动方程为

$$m\frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2}+r\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}+kx=0 \tag{1.47}$$

其中，变量 x 是摆锤在沿 x 轴方向上的位移，m、r、k 是常数。

在方程(1.47)的左边，令 $t\rightarrow t'=-t$，则有

$$\mathrm{d}t\rightarrow \mathrm{d}x'=d(-t)=\mathrm{d}t$$

$$x\rightarrow x'=x$$

在时间的正向流逝的方向上有

$$\mathrm{d}x\rightarrow \mathrm{d}x'=-\mathrm{d}x$$

这样就有

$$\begin{aligned} m\frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2}+r\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}+kx\rightarrow m\frac{\mathrm{d}^2 x'}{\mathrm{d}t'^2}+r\frac{\mathrm{d}x'}{\mathrm{d}t'}+kx' &= m\frac{\mathrm{d}^2 x}{d\,t^2}+r\frac{-\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}+kx \\ &= m\frac{\mathrm{d}^2 x}{d\,t^2}-r\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}+kx \end{aligned}$$

显然，阻尼摆的运动方程经过时间反演变换后已经成为完全不同的方程。而我们知道，物质变化过程的时间反演变换导致该变化过程的逆转，也就是说阻尼摆的运动过程与其逆过程是完全不同的两个变化过程，在阻尼摆的运动方程中对时间的一次导数项表示对阻尼摆能量的耗散，意味着单摆在该耗散项作用下摆锤的摆动幅度越来越小；而在单摆运动过程的逆过程中该一次导数项改变了符号，从对单摆的能量的衰减变为对单摆的能量的增益，意味着单摆在该增益项的作用下其摆锤的摆动幅度越来越大。从而阻尼摆的变化过程不具有时间反演变换不变性，或者说描述阻尼摆的运动过程的运动方程不具有时间反演变换不变性，更确切地说阻尼摆的运动过程不具有可逆性。

通过上述讨论可见，任何描述热力学系统的变化过程的方程都是时间反演变换对称破缺的。而描述基本物质变化过程的物理方程之所以具有时间反演变换不变性，主要原因在于这些基本方程所描述的物质变化过程是完全未考虑系统内或系统之间存在的能够导致能量耗散的复杂的相互作用等因素的理想化的变化过

程，也就是说在这些方程的建立过程中未考虑热力学第二定律能够起作用的各种因素，而由于任何实际发生的物质的变化过程本身就包含能够导致系统能量耗散的复杂的相互作用因素，因此描述现实发生的物质变化过程的所有物理方程都是时间反演变换对称破缺的。

1.4.6 微观物质变化过程中存在的导致时间反演变换对称性破缺的现象

由于在量子力学中存在的关于对微观粒子进行测量所导致的波函数的不可逆坍缩情况非常复杂、观点也不统一，在此我们就不对其进行深入讨论。但有一点我们必须清楚，无论如何波函数的不可逆坍缩绝不可能与所谓的时间的方向性有关，而且都说明了我们对微观粒子的测量只能造成微观粒子波函数的变化过程的不可逆性。我们下面讨论的主要是关于对微观粒子进行所谓的 TCP 变换中所存在的时间反演变换对称性破缺现象。

我们知道，在微观现象中有三种重要的基本分立对称性。

(1)空间反演变换对称性(即空间宇称守恒 P)。这是把空间坐标进行反演变换(也称做镜像变换)所对应的对称性，其内容是描述微观粒子体系运动过程的物理方程与用左手还是右手空间坐标系没有关系，或者说粒子与其镜像之间存在对称性。宇称 P 是用来描述粒子体系的运动和它的镜像运动是否具有对称性的一个物理量，通常宇称 P 被认为是与空间反演操作相对应的守恒量。

(2)时间反演变换对称性(即时间宇称 T，T 即是量子力学中对力学量进行是反演变换时常用的时间反演算符)。在前面已进行过详细的讨论，其内容是描述微观粒子体系运动过程的物理方程与使用时间 t 还是 $-t$ 没有关系，确切地说如果对任何一个可能发生的微观粒子体系的变化过程，其逆过程也是可能发生的过程，即描述微观粒子体系变化过程的物理方程具有时间反演变换对称性，那么我们就不可能判断该微观粒子体系的变化过程究竟是正向进行的还是逆向进行的。如一对光子发生碰撞导致电子和正电子的产生，反之正负电子相遇则会产生一对光子，这两个过程具有时间反演变换对称性，如果用摄像机拍下两个过程之一然后播放，观看者将不可能判断所看到的影像是正向还是逆向播放。

(3)电荷共轭变换对称性(即电荷宇称守恒 C)。其内容是如果把体系中的每一个粒子都用其反粒子来替换，那么描述该粒子体系变化过程的物理方程具有不变性。由于体系中的粒子用其反粒子代替等效于反向运动的粒子，从而粒子体系的电荷共轭变换与粒子体系的时间反演变换及空间反演变换之间具有密切的关系。

自量子力学理论体系建立以来，物理学家们一直以为 P、T 和 C 对称性都是自然界最基本的相互作用中必须严格遵循的对称性，特别是对于体系中粒子之间的

相互作用为电磁相互作用及强相互作用的情况，至少在 20 世纪 50 年代之前这三种对称性被人们的直觉认为是成立的。但这种直觉的观念在 20 世纪 50 年代被理论物理学家李政道和杨振宁先生所建立、由实验物理学家吴健雄女士用放射性钴 60($^{60}_{27}Co$)所进行的精确实验验证的"弱相互作用中宇称不守恒"的理论彻底颠覆。当时的高能物理实验出现了著名的 τ—θ 谜案，即所谓的 τ^+ 粒子与 θ^+ 粒子表现为既有诸多相同的性质又具有不同的衰变方式，从而很难判断这两种粒子究竟是否同一种粒子的谜案。其中 τ^+ 粒子的质量为 500MeV/C^2、自旋 J 为 0、平均寿命为 10^{-8}s、衰变末态为二个 π^+ 介子和一个 π^- 介子，即 $\tau^+ \to \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$；而 θ^+ 粒子的质量为 500MeV/C^2、自旋 J 为 0、平均寿命为 10^{-8}s、衰变末态为一个 π^+ 介子和一个 π^0 介子，即 $\theta^+ \to \pi^+ + \pi^0$。由此可见如果在弱相互作用过程中宇称是守恒的，从而 τ^+ 粒子具有奇宇称、θ^+ 粒子则具有偶宇称，这两种粒子显然是具有奇偶不同宇称的粒子。但是从这两种粒子的基本特性：质量、自旋和寿命等情况看，τ^+ 粒子与 θ^+ 粒子又应当归属于同一种粒子，这就是所谓 τ—θ 谜案。为了彻底解决 τ—θ 谜案，李政道、杨振宁查阅了 1956 年以前大量的关于轻子和核素的实验数据后发现，对于强相互作用和电磁相互作用的情况而言所有实验数据都证明宇称是守恒的；而对于弱作用过程，例如对于粒子的弱衰变、核素的 β— 衰变的实验，没有任何数据可以证明宇称是守恒的。李政道、杨振宁结合实验数据及理论分析提出，如果根据 τ^+ 粒子与 θ^+ 粒子具有相同的质量、自旋和寿命等基本特征而假定这两种表面上看来不相同的粒子是同一种粒子(该种粒子后来被称为 K^+ 介子)，那么就必须同时假定在弱相互作用过程中宇称是不守恒的，而这一点与所有相关的实验数据并不矛盾，同时所有相关的实验数据都可以得到系统的解释。李政道、杨振宁提出的弱相互作用过程中宇称不守恒的预言最终由华人物理学家吴健雄女士所作的实验得到了完美的验证。自李—杨通过对 τ—θ 谜案的解决过程中发现在弱相互作用中宇称不守恒现象后，科学家通过高能粒子物理实验又陆续发现了其他关于宇称不守恒的实例，如 π^+ 介子衰变产生 μ^+ 子及左旋中微子，即 $\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$，由于左旋中微子的镜像是右旋中微子，而右旋中微子(左旋中微子的镜像)是不存在的，这就意味着宇称守恒在相应的过程中是不成立的。实际上在 π^+ 介子衰变产生 μ^+ 子及左旋中微子的实例中电荷宇称守恒 C 同样不成立，因为电荷共轭宇称变换将左旋中微子变为左旋反中微子，而反左旋中微子并不存在，因此该弱相互作用导致的衰变违反电荷共轭宇称守恒。除了空间宇称守恒 P 及电荷宇称守恒 C 在弱相互作用中不再成立之外，这两种变换的乘积 PC 的对称性在某些微观现象中也受到了破坏，而对于这三种变换的乘积 TPC，物理学家从物理学理论的最基本假设推论出：所有相互作用过程在 CP 和 T 变换的联合作用(即 TCP 变换)下具有不变性，不管 C、P 及 T 在三者组合中的顺序如何排列，这是量子场论的一个重要定

理。到目前为止所有相关的实验以非常高的精度证明了 TCP 变换的对称性在所有相互作用中都普遍成立，从而被称做 TCP 定理。

TCP 定理最重要的一点是向我们揭示了如果所讨论的微观过程是 CP 变换对称的，那么该过程必定具有时间反演变换对称性 T；反之如果在某一过程中 CP 变换对称性受到了破坏，那么时间反演对称性 T 也将不再成立。由于已经有实验证明 CP 变换对称性在微观现象中并不是恒常成立的，这也就意味着时间反演对称性 T 在微观现象中同样可能遭到破坏。在长寿中性 K 介子的某些衰变中的时间反演变换对称性遭到破坏的现象是由 J. H. 克里斯坦森(J. H. Christenson)、J. W. 克罗宁(J. W. Cronin)、V. L. 菲奇(V. L. Fitch)和 R. 特雷(R. Turlay)等美国物理学家于 1964 年所作的实验发现的。在这些科学家所作的相关实验中，绝大多数长寿中性 K^0 介子中的每一个衰变后都生成一个负的 π 介子、一个正电子和一个中微子，即 $K^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e$，在相应的衰变过程中 CP 对称性得到严格遵守；而其中大约有十亿分之一的长寿中性 K^0 介子中的每一个则会衰变为一个正的 π 介子、一个电子和一个反中微子，即 $K^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e$，而相应的衰变过程中“CP 对称性受到破坏，由 TCP 定理可以间接证明时间反演变换对称性 T 在此过程中也同样受到破坏：时间可逆的事件被禁止，过程成为不可逆，时间箭头便显现出来①。”同样的，这里也不存在所谓的时间箭头，本质上这一实验证明的是 K 介子衰变为一个正的 π 介子、一个电子和一个反中微子的变化过程具有不可逆性。另外，除了热力学现象之外，包括相对论在内的描述基本的物质变化过程的经典物理学定律都被理论及实验证明具有时间反演变换不变性，而近几十年来物理学家一直在研究在微观现象中时间反演变换不变性是否同样适用。需要特别指出的是，20 世纪 90 年代，欧洲原子能中心的物理学家对中性 K 介子的衰变过程进行了观测并作出了重大发现：“1996 年 12 月 7 日，欧洲原子能研究中心的一个小组经过长达三年的研究最近终于获得了突破。他们的实验观测首次证明，至少在中性 K 介子衰变过程中，时间违背了对称性。由来自九个国家近百名研究人员组成的这一小组在实验中研究了 K 介子反 K 介子相互转换的过程(即 $\overline{K}^0 \rightarrow K^0$ 及 $K^0 \rightarrow \overline{K}^0$)。介子是一种质量比电子大、但比质子与中子小、自旋为整数、参与强相互作用的粒子，按内部量子数可分为 π 介子、ρ 介子和 K 介子等。研究人员在实验中发现，反 K 介子转换为 K 介子的速率要比其时间逆转过程、即 K 介子转变为反 K 介子来得要快。这是物理学史上首次直接观测到时间不对称现象②。”

---

① [英]彼得·柯文尼，罗杰·海菲尔德. 时间之箭——解开世间最大奥秘之科学旅程[M]. 江涛，向守平，译. 长沙：湖南科学技术出版社，1995：134.

② 物理学家发现首例违背时间对称性事件[EB/OL]. [1998-12-11]http://www.sina.com.cn.

这一发现具有重大意义，许多媒体都对此进行了特别的报道，有些相关报道甚至谬称这是人类首次发现时光可以倒流的实例。实际上，这一实验并没有也不可能证明时光的倒流，实际上时光不可能倒流。我们知道物质变化过程的不可逆性完全等效于时间反演变换的对称性破缺而与时间逆转（或倒流）概念完全无关，所以这里的反 K 介子与 K 介子之间相互转变的速率不相同（或者也可以说两者之间相互转变所需要的时间不同）的实验其实只是证明了反 K 介子与 K 介子之间在相互转变过程中所需要的时间的不对称性，同样也是不可逆性的一种表现形式，也可以说是证明了微观现象中存在的时间反演变换的对称性破缺。这种情况与热力学理论中策尔梅洛（E. Zermelo）提出的“复现定理”所描述的现象非常类似：任何孤立的、有限的保守动力学系统都能够在极其漫长但仍然是有限的时间（超过宇宙的存在时间）内恢复到尽可能接近于原始状态，与之相应的系统从原始状态自然地演变到任何一个状态所需要的时间则是相对短暂的。以上两个关于 K 介子的实验无可辩驳地证明了在微观现象中同样存在导致时间反演变换对称性破缺的现象。由此可见，微观现象中存在的时间反演变换对称破缺的现象是完全不同于宏观系统中因为耗散力的存在而导致的时间反演对称破缺的另外一种最基本的时间反演变换对称破缺现象，现象的背后必定具有不同于耗散力的更深刻的因素在起着作用。

通过上述详尽的分析可见，时间反演变换与时间倒流变换二者是完全不同的两个概念（通过下面我们对时间倒流变换的概念及方法的讨论可以更加清楚地了解到这一点），而很多学者在讨论时间反演变换的问题时往往对二者不加区分、完全混淆，即使是世界知名的学者也会在不经意间将时间反演变换直接解释为时间的方向倒转。确切地说，时间反演变换完全等效（或等价）于物质变化过程的逆转变换，即物质变化过程的时间反演变换导致该物质变化过程的逆转而时间的方向并不会因此而发生改变。我们知道时间反演变换是以时间坐标轴上特殊的时间值 $t=0$ 为对称轴将物质的变化过程作对称变换从而在数学上实现变化过程的逆转的一种方法，除此之外实际上还可以以任意的一个时刻值 $t=t_0$（假定 t_0 是现在所对应的时刻，显然 t_0 可以是任意的实数）为对称轴对描述物理量 $K=K(t)$ 变化过程的曲线进行对称变换，得到的新的物理量 $K'=K(2t_0-t)$（或 $K''=K(2t_0-t)$）变化的曲线同样是物理量 $K(t)$ 变化过程的逆过程，即相当于直接将物理量 $K=K(t)$ 中的时间 t 用 $2t_0-t$（而非 $-t$）代换，而且与以 $t_0=0$ 为对称轴的时间反演变换所得到的变化过程的逆过程完全等效，由此获得的各种结论也必定与时间反演变换的情况完全相同；显然，原变化过程与其逆过程都是在正向流逝的时间中发生的，只是由于这种方法较为复杂从而通常不被采用，如图 1－18 或图 1－19 所示。在图 1－18 或图 1－19 中如果令 $t_0=0$ 则相应的对称变换即为时间反演变换，也即

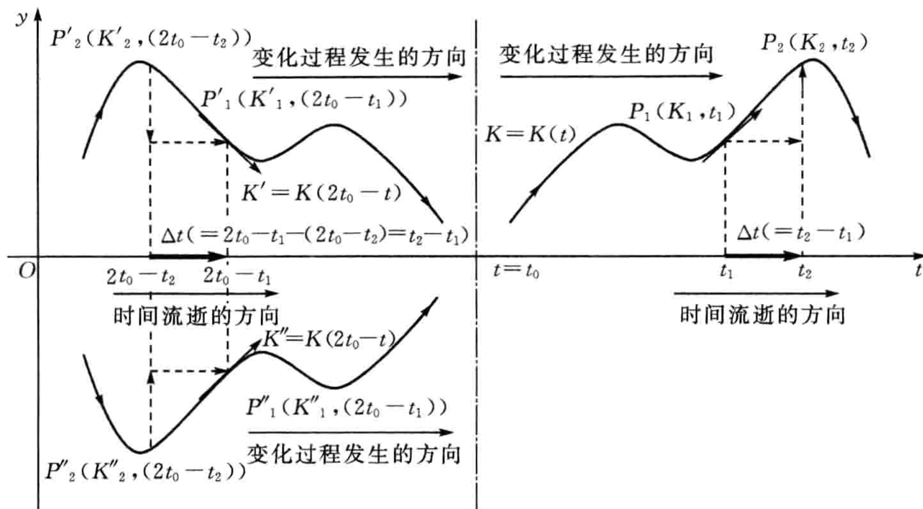


图 1－18　物理量 $K(t)$ 以 $t=t_0$ 为对称轴向“过去”所作的时间对称变换

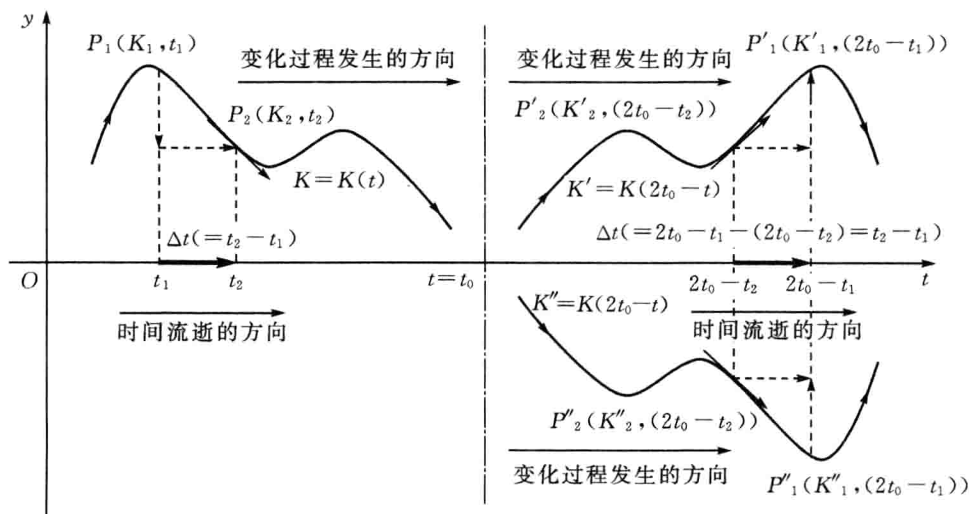


图 1－19　物理量 $K(t)$ 以 $t=t_0$ 为对称轴向“未来”所作的时间对称变换

是说时间反演变换是这里所说的物理量 $K(t)$ 的变化曲线关于 $t=t_0$ 为对称轴的对称变换的特殊情况。另外，从图 1－18 中可见这里的对称变换既可以向“过去”的时间区域进行(即所谓时间的反演变换，如图 1－18 所示的情况包括时间反演变换

的各种情况，假定图中的 t_0 是“过去”的某一时刻)，也可以向“未来”的时间区域进行(假定如图 1－19 所示的情况中 t_0 是“未来”的某一时刻，与反演变换情况完全不同，我们可以称其为时间正演变换)，但在数学上能够随意实现这种方式的变换并不代表在现实中就可以随意的直接到达“过去”的时间或到达“未来”的时间。另外，在数学上实现物体的运动过程的逆转还可以采用速度反演变换。也就是说在数学上有不止一种方法可以实现物质的变化过程的逆转，而时间反演变换则是其中一种最简洁、最常用的方法，从而时间反演变换只具有方法论的意义而没有其他特殊的意义，而且这是一种与物质变化过程的时间倒流变换形式完全不同的方法，因此在物质变化过程的时间反演变换中将时间 t 用 $-t$ 代换并非意味着在现实中我们可以回到过去的时间。

显然，在对物理方程进行时间反演变换过程中把方程里的时间参数 t 用 $-t$ 代换这一操作并非如英国物理学家彼得·柯文尼，罗杰·海菲尔德在其著作中所说的、也是当前物理学界普遍认为的，是“把前进的时间(‘正的时间’)替换为倒退的时间(‘负的时间’)”[①]，而是直接导致将物质的变化过程变换为其逆过程。因为无论对发生在“现在”这一时刻的物质的变化过程还是对发生在与“现在”这一时刻相对称的“过去”某一时刻的该物质变化过程的逆过程，时间的流逝的方向均是正向进行的，在时间反演变换中涉及的可逆性与不可逆性完全是物质变化过程的性质而非时间的性质，即并非时间的可逆性或不可逆性。牛顿力学、电磁学、相对论、量子力学等体系中描述相应的物质变化过程的基本方程具有时间反演变换不变性的特点，并非指这些方程不能够区分时间的正方向及反方向，而是指这些方程不能够区分方程所描述的相应的物质变化过程及其逆过程的方向，即这些物质变化过程及其逆过程对这些方程而言是完全相同的，在这种情况下物质的正向变化过程及逆向变化过程均是可能发生的变化过程。另外，热力学系统的变化过程中关于时间反演变换的对称破缺也不意味在热力学现象中产生出了“时间箭头”，更不意味着时间具有方向性，而是意味着热力学变化过程具有方向性，即热力学变化过程本身具有不可逆性或单向性，意味着在“过去”、“现在”或“未来”的不同的时间段中发生的热力学变化过程及其逆过程之间的不对称性，意味着在热力学现象中如果某一变化过程是能够发生的，那么该变化过程的逆过程就是不可能发生的或者发生的几率非常小，也就是说根本不存在热力学时间箭头、电磁学时间箭头及宇宙学时间箭头等，所有这些所谓的时间箭头都只是物质的变化过程的箭头或方向而非时间的箭头或方向，对此，我们在下面的章节还要进行更为详尽的论述。

---

① [英]彼得·柯文尼，罗杰·海菲尔德. 时间之箭——解开时间最大奥秘之科学旅程[M]. 长沙：湖南科学技术出版社，1995：35.

1.5 一切物质的存在及其变化过程都具有时间倒流变换不变性

上面我们在讨论描述物质变化过程的基本物理方程的时间反演变换时已经接触到时间倒流变换的概念，初步了解到这是一种能够导致时间流逝的方向发生反向却不能引起物质变化过程的方向发生逆转的时间对称变换，但没有对其进行展开讨论，下面我们将对其进行详细的论述。

我们知道，迄今为止我们在物理学的教材中以及在学术交流中所接触到的唯一的关于物理量及物理方程的时间分立对称性变换的概念是时间反演变换。所谓的对某一物理方程的时间反演变换，简单地说就是把该物理方程的等式两边出现的所有的时间 t 用"$t'=-t$"、$\mathrm{d}t$ 用"$\mathrm{d}t'=d(-t)=\mathrm{d}t$"代替，并结合方程中的各物理量对时间反演变换的奇偶性所进行的一种时间变换方式，时间反演变换是物理学中用于研究物质变化过程的可逆性的非常重要的一种数学方法。而我们认为，物理方程的时间反演变换并非关于时间的分立对称变换的唯一一种变换形式，"1932年魏格纳(Wigner)在量子力学中引进时间反演变换概念时指出，时间反演变换并不是时间的倒流，而是运动方向的逆转[①]"，这意味着物理学教材中人们经常接触到的所谓时间反演变换并非如人们通常理解的那样是时间的逆向流逝变换(即时间倒流变换)，从而提示我们还应该存在完全不同于时间反演变换的时间倒流变换。设想如果我们所处的宇宙中的时间发生逆向流逝，描述物质变化过程的物理方程又会出现什么情况呢？这种情况下我们必须考虑对物理方程进行时间倒流变换，这就是说时间倒流变换同样应该是一种不同于时间反演变换的关于时间的数学变换形式，而在物理学中也从未对时间的倒流变换进行过研究(或往往把这种变换与时间反演变换二者混淆)。那么什么是物质变化过程的时间倒流变换？如何对物质的变化过程进行时间倒流变换？我们知道，物理学家通常所研究的物质的变化过程都是在我们称之为正向流逝的时间中发生的(所谓正向流逝的时间的方向是时间不断增大的方向，完全等效于用顺时针旋转的时钟进行计时的情况)。物质变化过程的时间倒流变换则是设想物质的变化过程在逆向流逝的时间中发生(所谓逆向流逝的时间的方向是时间不断减小的方向，通过下面的讨论我们可以发现逆向流逝的时间完全等价于用逆时针旋转的时钟进行计时的情况)，而后研究在这种逆向流逝的时间中物质的变化过程与在正向流逝的时间中同一变化过程之间的差异。因此要研究物质在逆向流逝的时间中的变化规律与物质在正向流逝的时间中的变化规律有何不同，我们可以对正向流逝的时间中的物质的变化过程进行

---

① 刘希明. 高等量子力学[M]. 济南：山东科学技术出版社，2002：229.

时间的逆向流逝变换，而后比较两者的差异。下面是物质的变化过程的时间倒流变换的定义：假定参照系 K 与 K' 是物理环境完全相同的两个（惯性的或非惯性的）参照系，K 系中的时间是正向流逝的，K' 系中的时间则是逆向流逝的，并且 K 系与 K' 系之间相对静止。

我们在 K 系及 K' 系中分别建立空间—时间直角坐标系 $Oxyzt$ 及 $O'x'y'z't'$，并且令 $Ox /\!/ O'x'$、$Oy /\!/ O'y'$、$Oz /\!/ O'z'$。现在把长度单位完全相同的两把量杆分别放置在两个参照系中，并且把频率及结构完全相同、计时均从零同时开始的两只时钟中的其中一只时钟放置在 K 系中，另一只时钟则放置在 K' 系中。显然，两参照系的直角坐标系之间存在如下关系：

$$x' = x - a$$
$$y' = y - b$$
$$z' = z - c$$
$$t' = -t$$

其中，a、b、c 均为常数。则对于 K 系中发生的可以用物理方程 $F(x,y,z,t)=0$ 描述的物质的变化过程，K' 系中的观察者借助所在参照系中的量杆及时钟测得的相应的参数建立的物理方程 $F'(x',y',z',t')=0$ 即描述了 K' 系中的观察者所观察到的该物质的变化过程。这样，方程 $F'(x',y',z',t')=0$ 即是该物质的变化过程的时间倒流变换。为了与时间反演变换相区别，我们把描述物质变化过程的物理方程的时间倒流变换表示为：$t \longmapsto t' = -t$，则 $F(x,y,z,t)=0 \longmapsto F'(x',y',z',t')=0$。在此需要补充说明的是，与时间反演变换不同，对描述物质变化过程的物理方程进行时间倒流变换时，由于涉及参照系之间的整体变换，因此除了要把方程中的时间参数 t 用 $-t$ 替换外，对于微分方程等含有时间微分的 $\mathrm{d}t$ 还必须用 $-\mathrm{d}t$ 替换，以此反映时间的倒流；而对微分方程的情况，在进行时间反演变换，即令 $t \to t' = -t$ 时，对其中所含的 $\mathrm{d}t$ 则不能用 $-\mathrm{d}t$ 替换，因为进行时间反演变换时时间并没有发生倒流；另外还必须把方程中包括速度、加速度、物理常数等含有时间单位的参数在逆向流逝的时间中进行重新计算而不是保持不变。我们知道，时间反演变换是用于研究物质变化过程的可逆性的方法，虽然是一种时间对称变换，但由于在变换过程中时间的方向（$\mathrm{d}t$）始终没有发生改变，因此仍然可以被看做是同一参照系中的变换；而时间倒流变换虽然也是一种时间对称变换，但与时间反演变换不同的是，时间倒流变换是关于两个参照系之间的时间对称性变换，一般情况下可以借助对物理方程的时间倒流变换来实现，其目的是用于确定时间是否具有流动性。

那么物质的变化过程的时间倒流变换具有怎样的性质呢？在讨论之前我们先提出一个公理及关于计量单位的概念。

公理1：对于一个作直线运动的物体而言，该物体发生位移（即位置移动）的方

向与其运动速度的方向在任一时刻以及在任何情况下都是完全相同的。

基本计量单位：可以而且必须通过直接测量而获取的物理量的计量单位称做基本计量单位，相应的物理量被称做基本物理量。物理量的基本计量单位有 7 个，分别是长度计量单位 m、质量计量单位 kg、时间计量单位 s、电流强度计量单位 A、热力学温度计量单位 K、物质的量的计量单位 mol、发光强度计量单位 cd 等，其他所有物理量得计量单位都可以通过对基本计量单位的计算获得。

导出计量单位：在物理学中必须通过两个或两个以上基本物理量的计量单位的计算获得的计量单位称为导出计量单位。比如速度，其计量单位是 m/s，即是说速度的计量单位是通过长度单位与时间单位之间的计算获得的计量单位；再比如能量的计量单位是焦耳，也是一个导出计量单位，用基本计量单位表示为 $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$，即是说能量的计量单位是通过长度单位、质量单位及时间单位之间的运算获得的计量单位。

1.5.1　经典力学描述的物质的变化过程具有时间倒流变换不变性

假定 K 系中的时间是正向流逝的，从而 K 系中的观察者使用的时钟是顺时针旋转的；K 系中有一物体沿 X 轴的正方向上作匀速直线运动，物体的运动速度为 V，在时刻 t_0 物体处于 X 轴上的 X_0 点，则到时刻 t_1 物体沿 X 轴的正方向运动至 X 轴上的 X_1 点，如图 1-20 所示，则物体的运动产生的位移与产生相应的位移所需要的时间之间的关系为：

$$S = X_1 - X_0 = V(t_1 - t_0) = V\Delta t \tag{1.48}$$

其中 $\Delta t = t_1 - t_0$。由于 K 系中的时间是正向流逝的并且 K 系中的观察者须采用顺时针旋转的时钟来计时，这样其计时单位为“1s”，所以 $t_1 > t_0$，$\Delta t > 0$。显然公式(1.48)中物体运动的速度不能直接通过测量获取，而必须经过对速度公式 $V = S_1/\Delta t_1$ 的计算获取，在此速度的计量单位是导出计量单位 $m \cdot s^{-1}$。这里的 S_1 是匀速直线运动的物体沿 X 轴的正方向从 X 轴上的一点 X_2 运动至另一点 X_3 的变化过程中经过时间间隔 $\Delta t_1 = t_3 - t_2$（显然 $t_3 > t_2$）所发生的位移，即 $S_1 = X_3 - X_2$。由公理 1 可知物体的运动速度 V 的方向与物体的位移 S 及 S_1 的方向完全相同，这样公式(1.48)可表达为：

$$S = V\Delta t = (S_1/\Delta t_1)\Delta t \tag{1.48a}$$

现假定 K' 系中的时间是逆向流逝的，从而 K' 系中的观察者使用的时钟是逆时针旋转的；假定 K 系与 K' 系之间相对静止，则从 K' 系中的观察者的角度描述 K 系中的物体沿 X 轴的正方向上作匀速直线运动即是对 K 系中的物体沿 X 轴的正方向上作匀速直线运动的时间倒流变换（即 $t \mapsto t' = -t$）。K' 系中对物体沿 X 轴的正方向上作匀速直线运动的描述如图 1-21 所示，图中 $-t_0 > -t_2 > -t_3 > -t_1$，

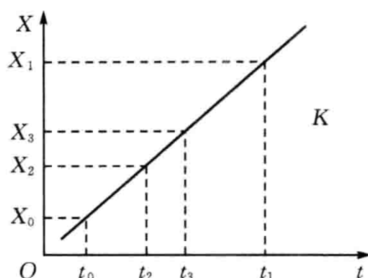


图 1－20 参照系 K 中的观察者测量到的物体的匀速直线运动

即时间参数轴箭头的方向是时间不断减小的方向。由于 K' 系中的时间是逆向流逝的并且 K' 系中的观察者须采用逆时针旋转的时钟来计时，即是说其计时单位为“－1s”。这样，经过时间倒流变换后物体的位移公式(1.48)的等式的右边为：

$$\begin{aligned}&\{S_1/[-t_3-(-t_2)]\}[-t_1-(-t_0)]\\&=[S_1/(-\Delta t_1)](-\Delta t)\\&=V\Delta t\\&=S\end{aligned}$$

即 K' 系中的观察者观察到的物体发生的匀速直线运动的位移 S 的数值及方向与 K 系中的观察者观察到的物体发生的匀速直线运动的位移 S 的数值及方向完全相同，确切地说物体的位移 S 的数值及方向都不会因为时间倒流变换而发生变化，即 $t\longmapsto t'=-t$，则 $S\longmapsto S'=S$。在此，公式中的 $S_1/(-\Delta t_1)$ 是物体在正向流逝的时间中的运动速度 $V=S_1/\Delta t_1$ 经过时间倒流变换后得到的逆向流逝的时间中物体的运动速度，显然参照系 K' 中物体运动速度的意义已不同于参照系 K 中的情况，这一点从图 1－21 中也可获知。所以在对物体的匀速直线运动的变化过程进行时间倒流变换时，必须同时考虑在逆向流逝的时间中对其运动速度进行重新计算，这样才能得到时间倒流变换的正确结果。由公理 1 可知在任何情况下物体的运动速度的方向都必须与物体的位移 S 的方向相同，从而在逆向流逝的时间中物体的运动速度的方向与在逆向流逝的时间中物体的位移 S 方向完全相同，所以对物体的匀速直线运动的时间倒流变换也不可能导致物体运动速度的反向，即 $S_1/(-\Delta t_1)$ 与 $-V$ 仅仅在数学意义上是相等的，在物理学意义上则是完全不相等的。显然，我们不能简单地从数学形式上理解经过时间倒流变换后物体运动的速度的意义，而必须结合其物理过程进行理解，在逆向流逝的时间中物体的匀速直线运动的速度 $S_1/(-\Delta t_1)$ 的意义是物体在逆向流逝的时间间隔 $-\Delta t_1$ 中物体沿 X 轴的正方向所发生的位移量为 S_1(或者在“－1s”时间段中物体沿 X 轴的正方向所发生的

位移量为 $S_1/\Delta t_1$)。至此我们可以得到结论,物体发生匀速直线运动的变化过程具有时间倒流变换不变性,或者更确切地说时间倒流变换(时间的逆向流逝)对物体的匀速直线运动的位移及速度的量值及方向不会产生任何影响,时间倒流变换(时间逆向流逝)只有符号的意义而没有真正的物理意义,完全等同于我们使用逆时针旋转的时钟获得的时间,所以物体发生匀速直线运动的变化过程的时间倒流变换不变性也可以表述为对物体发生匀速直线运动的变化过程而言,不论使用顺时针旋转的时钟进行计时还是使用逆时针旋转的时钟进行计时都没有任何区别。对于物体的变速直线运动甚至是曲线运动的情况可以借助微积分的方法进行简单的处理,结论是完全相同的,即物体的变速直线运动或者曲线运动的变化过程具有时间倒流变换不变性。

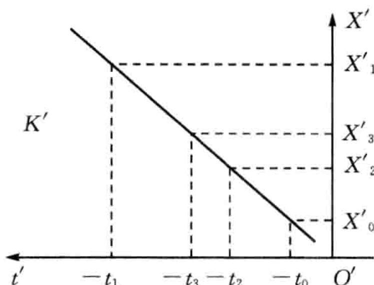


图1-21　参照系 K' 中的观察者测量到的物体的匀速直线运动

通过上面物体的匀速直线运动的变化过程的时间倒流变换的例子可以得到结论:在对物质的变化过程进行时间倒流变换的操作中,必须把描述物质的变化过程的方程中所有其计量单位中含有时间或时间的倒数因子的导出计量单位的物理量(如速度、加速度、动量、能量等)中的时间单位也进行时间倒流变换,即 $1\text{s}\mapsto -1\text{s}$,即进行时间倒流协同变换,也即从处于时间逆向流逝(或逆向计时)的参照系中的观察者的角度对物质的变化过程进行描述,由于速度的计量单位是导出计量单位,其单位获取的过程即是量值计算的过程,所以在对物体的匀速直线运动的变化过程进行时间倒流变换时,也必须对速度单位中所含的时间单位进行时间倒流变换,因为在这里速度的量值是在逆向流逝(或逆向计时)的时间中获得的,而只有这样才能得到时间倒流变换的正确结论。据此可以证明,对于任何一个具有导出计量单位的物理量,如果该物理量的计量单位中的时间量纲为偶数次幂,则该物理量具有时间倒流变换不变性;如果该物理量的计量单位中的时间量纲为奇数次幂,则该物理量的时间倒流变换将导致该物理量改变符号。这些结论与常见物理量、物理量的微分及物理量的时间反演变换的结论完全类似,由于证明过程非常简单,我们

在此不再赘述。

由存在相互作用的质点构成的动力学体系，可以用牛顿动力学方程描述：

$$m_i \frac{d^2 x}{d t^2} = F_i x \tag{1.49}$$

$$m_i \frac{d^2 y}{d t^2} = F_i y \tag{1.50}$$

$$m_i \frac{d^2 z}{d t^2} = F_i z \tag{1.51}$$

式中，m_i是体系中某一质点的质量；F_i是该质点在体系中受到的其他质点对其产生的作用力的总和。显然，上述方程具有时间倒流变换不变性。

我们知道，由存在相互作用的质点构成的动力学体系除了可以用牛顿动力学方程描述之外，还可以用以下哈密顿正则方程来描述：

$$\frac{d q_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_i} \tag{1.52}$$

$$\frac{d p_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_i} \tag{1.53}$$

式中，$i = 1,2,3,\cdots,n$；q_i 为质点的广义坐标；p_i 为质点的广义动量；$H = \sum_i \frac{p_i^2}{2 m_i} + U(q_1,\cdots,q_{3n})$ 为动力学系统的哈密顿量。对方程(1.52)，令 $t \mapsto t' = -t$，则有：

$$dt \mapsto dt' = d(-t) = -dt$$

这里的情况显然与时间反演变换中完全不同。则在方程的左边有：

$$\frac{d q_i}{dt} \mapsto \frac{d q'_i}{dt'} = \frac{d q_i}{d(-t)} = \frac{d q_i}{-dt} = -\frac{d q_i}{dt}$$

在方程的右边有：

$$\frac{\partial H}{\partial p_i} \mapsto \frac{\partial H}{\partial p_i} = \frac{\partial H'}{\partial p'_i} = \frac{\partial H}{\partial (-p)_i} = -\frac{\partial H}{\partial p_i}$$

所以方程(1.52)具有时间倒流变换不变性；对于方程(1.53)，令 $t \mapsto t' = -t$，则在方程的左边有：

$$\frac{d p_i}{dt} \mapsto \frac{d p'_i}{dt'} = \frac{d(-p)_i}{d(-t)} = \frac{-d p_i}{-dt} = \frac{d p_i}{dt}$$

在方程的右边有：

$$-\frac{\partial H}{\partial q_i} \mapsto -\frac{\partial H'}{\partial q'_i} = -\frac{\partial H}{\partial q_i}$$

所以方程(1.53)具有时间倒流变换不变性，即存在相互作用的质点构成的动力学体系的变化过程具有时间倒流变换不变性。

由存在相互作用的质点构成的动力学体系还可以用拉格朗日动力学方程

描述：

$$\frac{\partial L}{\partial q_i}-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial(\mathrm{d}q_i/\mathrm{d}t)}\right)=0 \tag{1.54}$$

式中，$i=1,2,\cdots,n$；$L[q(t),\mathrm{d}q/\mathrm{d}t]=T(\mathrm{d}q_1/\mathrm{d}t,\cdots,\mathrm{d}q_{3n}/\mathrm{d}t)-V(q_1,\cdots,q_{3n})$是拉格朗日函数。对于方程(1.54)，令$t\mapsto t'=-t$，则有：

$$\mathrm{d}t\mapsto \mathrm{d}t'=\mathrm{d}(-t)=-\mathrm{d}t$$

在方程的左边有：

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial q_i}-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial(\mathrm{d}q_i/\mathrm{d}t)}\right)&\mapsto\frac{\partial L'}{\partial q'_i}-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t'}\left(\frac{\partial L'}{\partial(\mathrm{d}q'_i/\mathrm{d}t')}\right)\\&=\frac{\partial L}{\partial q_i}-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}(-t)}\left(\frac{\partial L}{\partial[\mathrm{d}q_i/\mathrm{d}(-t)]}\right)\\&=\frac{\partial L}{\partial q_i}-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial(\mathrm{d}q_i/\mathrm{d}t)}\right)\end{aligned}$$

显然方程(1.54)具有时间倒流变换不变性，所以经典力学描述的物质的变化过程具有时间倒流变换不变性。

1.5.2 电磁学描述的物质的变化过程具有时间倒流变换不变性

电磁学的理论体系主要由麦克斯韦方程组构成，真空中的麦克斯韦方程组是：

$$\nabla\cdot B=0 \tag{1.55}$$

$$\nabla\times E=-\frac{1}{C}\frac{\partial B}{\partial t} \tag{1.56}$$

$$\nabla\cdot E=4\pi\rho \tag{1.57}$$

$$\nabla\times B=\frac{1}{C}\frac{\partial E}{\partial t}+\frac{4\pi}{C}J \tag{1.58}$$

式中，$\nabla=\frac{\partial}{\partial x}i+\frac{\partial}{\partial y}j+\frac{\partial}{\partial z}k$为梯度算符；$E$为电场强度；$B$为磁感应强度；$J=\rho v$为电流密度；$C$是光速。

对于方程(1.55)及(1.57)，令$t\mapsto t'=-t$，则有：

$$\mathrm{d}t\mapsto \mathrm{d}t'=\mathrm{d}(-t)=-\mathrm{d}t$$

由于电荷的运动方向不会因时间倒流变换而发生改变，因此有：

$$E\mapsto E'=E$$

$$\mathrm{d}E\mapsto \mathrm{d}E'=\mathrm{d}E$$

$$B\mapsto B'=B$$

$$\mathrm{d}B\mapsto \mathrm{d}B'=\mathrm{d}B$$

$$\nabla\mapsto\nabla'=\nabla$$

$$\nabla\cdot E\mapsto\nabla'\cdot E'=\nabla\cdot E$$

$$\nabla \cdot B \longmapsto \nabla' \cdot B' = \nabla \cdot B$$

$$\rho \longmapsto \rho' = \rho$$

式中，$\nabla' = \frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k$；所以方程(1.55)及(1.57)具有时间倒流变换不变性；另外，方程(1.56)可以表达为：

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial Ct}$$

方程(1.58)可以表达为：

$$\nabla \times B = \frac{\partial E}{\partial Ct} + 4\pi\rho\frac{V}{C}$$

对于方程(1.56)及(1.58)，令 $t \longmapsto t' = -t$，则有：

$$\mathrm{d}t \longmapsto \mathrm{d}t' = \mathrm{d}(-t) = -\mathrm{d}t$$

且

$$Ct \longmapsto C't' = (-C)(-t) = Ct$$

$$\frac{\partial B}{\partial Ct} \longmapsto \frac{\partial B'}{\partial C't'} = \frac{\partial B}{\partial(-C)(-t)} = \frac{\partial B}{\partial Ct}$$

$$\frac{V}{C} \longmapsto \frac{V'}{C'} = \frac{(-V)}{(-C)} = \frac{V}{C}$$

$$\frac{\partial E}{\partial Ct} \longmapsto \frac{\partial E'}{\partial C't'} = \frac{\partial E}{\partial(-C)(-t)} = \frac{\partial E}{\partial Ct}$$

$$\nabla \times E \longmapsto \nabla' \times E' = \nabla \times E$$

$$\nabla \times B \longmapsto \nabla' \times B' = \nabla \times B$$

故方程(1.56)及(1.58)具有时间倒流变换不变性。

现在我们再看电磁学中洛伦兹力的时间倒流变换，以下是洛伦兹力的公式：

$$F = eE + \frac{e}{C}V \times H \qquad (1.59)$$

对公式(1.59)，令 $t \longmapsto t' = -t$，则等式的左边：

$$F \longmapsto F' = F$$

等式的右边：

$$eE + \frac{e}{C}V \times H \longmapsto e'E' + \frac{e'}{C'}V' \times H'$$

$$= eE + \frac{e}{(-C)}(-V) \times H$$

$$= eE + \frac{e}{C}V \times H$$

所以：

$$F = eE + \frac{e}{C}V \times H$$

即洛伦兹力具有时间倒流变换不变性。

另外，电磁波作为麦克斯韦方程组的解，描述电磁波的波动方程虽然有推迟解与超前解，但我们通过分析可以发现电磁波的推迟解与超前解同样具有时间倒流变换不变性，因此，物理学家在解麦克斯韦方程组得到关于电磁波的波动方程的解时，选择的推迟波的解并不代表时间的电磁箭头，由于证明过程非常简单，我们就不再进行讨论。

1.5.3 量子力学描述的物质的变化过程具有时间倒流变换不变性

我们知道，德布罗意物质波是用波函数 $\psi(r,t)$ 描述的，对于能量为恒定值 E、动量为恒定值 p 的微观粒子，在时刻 t、空间坐标为 r 的点上该粒子的波函数 $\psi(r,t)$ 为单色平面波，其表达式为：

$$\psi(r,t) = A\,e^{i(p\cdot r - E\cdot t)/\hbar}$$

对于波函数 $\psi(r,t)$，令 $t \mapsto t' = -t$，由于普朗克常数 $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ 的单位是导出计量单位 $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$，所以有：

$$\hbar \mapsto \hbar' = -\hbar$$

另外波函数 $\psi(r,t)$ 可以表达为：

$$\begin{aligned}\psi(r,t) &= A\,e^{i(p\cdot r - E\cdot t)/\hbar}\\ &= A\,e^{2\pi i(p\cdot r/h - E\cdot t/h)}\\ &= A\,e^{2\pi i(r/\lambda - \gamma t)}\end{aligned}$$

在波函数 $\psi(r,t)$ 的表达式中，由于 γ 是波函数 $\psi(r,t)$ 的频率，所以有：

$$\gamma t \mapsto \gamma' t' = (-\gamma)(-t) = \gamma t$$

另外，由于 r 是粒子可能在其上出现的空间的坐标，λ 为物质波的波长，显然有关系：

$$r/\lambda \mapsto r'/\lambda' = r/\lambda$$

所以有：

$$A\,e^{2\pi i(r/\lambda - \gamma t)} \mapsto A\,e^{2\pi i(r'/\lambda' - \gamma' t')} = A\,e^{2\pi i\{r/\lambda - (-\gamma)(-t)\}} = A\,e^{2\pi i(r/\lambda - \gamma t)}$$

即

$$\psi(r,t) \mapsto \psi(r',t') = \psi(r,t)$$

这就是说对于能量 E 为恒定值、动量为 p 也为恒定值的微观粒子，在时刻 t、空间坐标为 r 的点上，该粒子的波函数 $\psi(r,t)$ 具有时间倒流变换不变性。一般的，对于粒子的能量 E 及动量 p 不为恒定值的情况，其波函数就不是单色平面波，而对这种情况可以用傅里叶级数把相应的波函数 $\psi(r,t)$ 分解为一系列单色平面波的波函

数$\psi_n(r,t)$的叠加，这也就意味着对于粒子的能量 E 及动量 p 不为恒定值的情况，粒子的波函数 $\psi(r,t)$同样具有时间倒流变换不变性，我们在此就不进行详细讨论了。

另外我们知道，微观物质的变化过程要由量子力学进行描述，非相对论性量子力学主要由薛定谔波动方程及海森堡的矩阵力学构成，而薛定谔波动方程与海森堡的矩阵力学是完全等价的，所以我们这里只讨论薛定谔波动方程的时间倒流变换。薛定谔波动方程在 1.3 节已提到过，在此我们重新列出该方程：

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(r,t)=\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+U(r,t)\right]\psi(r,t)$$

式中，$\psi(r,t)$为波函数。

令 $t\mapsto t'=-t$，则有：

$$\mathrm{d}t\mapsto \mathrm{d}t'=d(-t)=-\mathrm{d}t$$

在薛定谔波动方程的右边有：

$$U(r,t)\mapsto U'(r',t')=U(r,t)$$

$$\frac{\hbar^2}{2m}\mapsto\frac{\hbar'^2}{2m'}=\frac{(-\hbar)^2}{2m}=\frac{\hbar^2}{2m}$$

$$\nabla\mapsto\nabla'=\nabla,\nabla^2\mapsto\nabla'^2=\nabla^2$$

$$\psi(r,t)\mapsto\psi(r',t')=\psi(r,t)$$

从而

$$\begin{aligned}\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+U(r,t)\right]\psi(r,t)\mapsto&\left[-\frac{\hbar'^2}{2m'}\nabla'^2+U(r',t')\right]\psi(r',t')\\&=\left[-\frac{(-\hbar)^2}{2m}\nabla^2+U(r,t)\right]\psi(r,t)\\&=\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+U(r,t)\right]\psi(r,t)\end{aligned}$$

另外，在薛定谔波动方程的左边有：

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(r,t)\mapsto i\hbar'\frac{\partial}{\partial t'}\psi(r',t')=i(-\hbar)\frac{\partial}{\partial(-t)}\psi(r,t)=i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(r,t)$$

所以，薛定谔波动方程具有时间倒流变换不变性。

Klein-Gordon 方程是描述自旋为 0 的粒子的相对论性量子力学方程，其方程为：

$$-\frac{\hbar^2}{C^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\psi(r,t)=(-\hbar^2\nabla^2+m^2C^2)\psi(r,t)$$

式中，C 是光速；m 是粒子的质量。

令 $t\mapsto t'=-t$，则有：

$$\mathrm{d}t\mapsto \mathrm{d}t'=\mathrm{d}(-t)=-\mathrm{d}t$$

在 Klein-Gordon 方程的左边有：

$$-\frac{\hbar^2}{C^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\psi(r,t)\longmapsto-\frac{\hbar'^2}{C'^2}\frac{\partial^2}{\partial t'^2}\psi(r',t')=-\frac{(-\hbar^2)}{(-C)^2}\frac{\partial^2}{\partial(-t)^2}\psi(r,(-t))$$
$$=-\frac{\hbar^2}{C^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\psi(r,t)$$

在 Klein-Gordon 方程的右边有：

$$(-\hbar^2\nabla^2+m^2C^2)\psi(r,t)\longmapsto(-\hbar'^2\nabla'^2+m'^2C'^2)\psi(r',t')$$
$$=(-(-\hbar)^2\nabla^2+m^2(-C^2))\psi(r,t)$$
$$=(-\hbar^2\nabla^2+m^2C^2)\psi(r,t)$$

即 Klein-Gordon 方程具有时间倒流变换不变性。

Dirac 方程是描述自旋为 1/2 的粒子的相对论性量子力学方程，其方程为：

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(r,t)=(-i\hbar C\alpha\cdot\nabla+\beta m_0C^2)\psi(r,t)$$

式中，C 是光速；m_0 是粒子的质量；α、β 是线性 4×4 矩阵算符。

令 $t\longmapsto t'=-t$，则有：

$$\mathrm{d}t\longmapsto\mathrm{d}t'=\mathrm{d}(-t)=-\mathrm{d}t$$

则在 Dirac 方程的左边有：

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(r,t)\longmapsto i\hbar'\frac{\partial}{\partial t'}\psi(r',t')=i(-\hbar)\frac{\partial}{\partial(-t)}\psi(r,t)=i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(r,t)$$

在 Dirac 方程的左边有：

$$(-i\hbar C\alpha\cdot\nabla+\beta m_0C^2)\psi(r,t)\longmapsto(-i\hbar'C'\alpha\cdot'\nabla'+\beta'm_0'C'^2)\psi(r',t')$$
$$=(-i(-\hbar)(-C)\alpha\cdot\nabla+\beta m_0C^2)\psi(r,(-t))$$
$$=(-i\hbar C\alpha\cdot\nabla+\beta m_0C^2)\psi(r,t)$$

即 Dirac 方程具有时间倒流变换不变性。

又如对光子—电子散射实验即康普顿效应的机理解释可以用两种方法进行描绘：时间正向流逝的世界线描绘及费曼图描绘。光子—电子散射实验用时间正向流逝的世界线描绘如图 1-22①中，开始时，光子和电子相互接近。在点 A 处光子产生出电子—正电子对，其中电子对中的电子沿右上方远离 A 点而去，正电子则沿左上方与原电子在 B 点处相互碰撞，并在此同时湮灭产生一新光子。另外，光子一电子散射实验也可以用费曼图进行描绘，如图 1-22③所示，以下是物理学中常见的解释：可以认为图中的电子运动到 B 点时，发射一个光子后该电子逆转其在时间中的进程，电子从“现在”进入到“过去”，当电子行进到 A 点并在该点上吸收入射光子后再次反转其时间进程，即电子又从“过去”进入到“现在”，最终沿右上方的方向远离 A 点而去。费曼图中对光子—电子散射实验的解释显然是错误的，也即是说电子不可能进入到“过去”。我们知道，图 1-22①中在正向流逝的时间

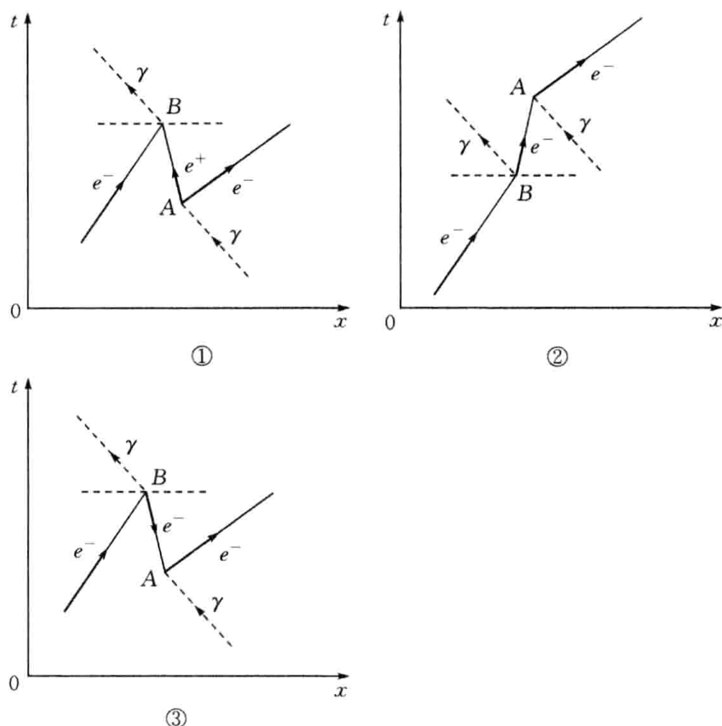


图 1－22 光子—电子散射实验的机理图解

中正电子从 A 点开始经过运动而后到达 B 点，这一情况完全等效于图 1－22②在正向流逝的时间中电子从 B 点开始经过运动而后到达 A 点的情况，也即是说图 1－22①与图 1－22②才是对光子—电子散射实验完全等效的同一种描述。另外，我们知道，物质的运动过程具有时间倒流变换不变性，这样把图 1－22②中仅仅是电子从 B 点开始经过运动而后到达 A 点的运动过程进行时间倒流变换，从而得到图 1－22③，即图 1－22③中的电子从 B 点开始经过运动而后到达 A 点的运动过程，虽然是发生在逆向流逝的时间中的，但电子从 B 点到达 A 点所发生的位移及电子的运动速度与图 1－22②所示的电子从 B 点到达 A 点所发生的位移及电子的运动速度完全相同。在图 1－22①中，如果把从 A 点到 B 点运动的正电子换成电子，那么其运动方向必定是从 B 点到 A 点，这样在图 1－22③中的 $\overrightarrow{BA}$ 段对应的时间 t 虽然是逆向流逝的，但电子的运动方向并没有因此发生改变，仍然是从 B 点开始经过运动到达 A 点，即在图 1－22③中电子从 B 点运动到 A 点这一段行程，虽然对电子的运动过程进行了时间倒流变换，但电子的运动方向并没有因此发生逆转，即电子的运动过程具有时间倒流变换不变性。显然，图 1－22③是对图 1－22

①更自然地等效描绘。这样,对图 1-22③的正确解释应该是:电子在正向流逝的时间中,从左下方开始向右上方运动,在 B 点,该电子释放一光子,光子在正向流逝的时间中向左上方飞逝,该电子则在逆向流逝的时间中向 A 点方向运动,当该电子到达 A 点后,在 A 点吸收入射的光子,然后在正向流逝的时间中向右上方方向离 A 点而去。这里的解释非常自然(并适用于一切微观粒子的费曼图描绘的解释),根本不涉及电子需要进入"过去"这样一个纯属想象的图景。以上实例说明微观物质的变化过程也具有时间倒流变换不变性。

1.5.4 相对论描述的物质的变化过程具有时间倒流变换不变性

由于洛伦兹变换是狭义相对论的基础,我们在此就洛伦兹变换的时间倒流变换进行讨论。在两个参照系 K 及 K^* 中分别建立关于一维空间及一条时间参数数轴构成的坐标系 oxt 及 $o^*x^*t^*$,假定参照系 K 及 K^* 之间在 X 轴的方向上相对运动速度为 V,则对于在 K^* 系中发生的坐标为 x^*、时钟显示为 t^* 时刻的事件,在 K 系中的观察者看来,其发生的坐标为:

$$x^* = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - V^2/C^2}} \tag{1.60}$$

在 K 系中的观察者看来,其发生的时刻为:

$$t^* = \frac{t - \frac{V}{C^2}x}{\sqrt{1 - V^2/C^2}} \tag{1.61}$$

公式(1.61)可以变换为:

$$Ct^* = \frac{Ct - \frac{V}{C}x}{\sqrt{1 - V^2/C^2}} \tag{1.61a}$$

在公式(1.60)及(1.61a)中,令 $t \mapsto t' = -t$,则有:

$$x \mapsto x' = x$$

$$Vt \mapsto V't' = (-V)(-t) = Vt$$

从而有:

$$\frac{x - Vt}{\sqrt{1 - V^2/C^2}} \mapsto \frac{x' - V't'}{\sqrt{1 - V'^2/C'^2}} = \frac{x - (-V)(-t)}{\sqrt{1 - (-V)^2/(-C)^2}} = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - V^2/C^2}}$$

$$x^* \mapsto x^{*\prime} = x^*$$

另外

$$Ct \mapsto C't' = (-C)(-t) = Ct$$

$$\frac{V}{C}x \mapsto \frac{V'}{C'}x' = \frac{(-V)}{(-C)}x = \frac{V}{C}x$$

从而有：

$$\frac{Ct-\frac{V}{C}x}{\sqrt{1-V^2/C^2}}\mapsto\frac{C't'-\frac{V'}{C'}x'}{\sqrt{1-V'^2/C'^2}}=\frac{(-C)(-t)-\frac{(-V)}{(-C)}x}{\sqrt{1-(-V)^2/(-C)^2}}=\frac{Ct-\frac{V}{C}x}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$$

$$C^* t\mapsto C't^{*\prime}=(-C)(-t^*)=Ct^*$$

$$t^*\mapsto t^{*\prime}=-t^*$$

所以公式(1.60)及(1.61a)以及公式(1.61)具有时间倒流变换不变性；反之，如果令 $t^*\mapsto t^{*\prime}=-t^*$，同样可以证明洛伦兹变换的逆变换也具有时间倒流变换不变性。另外，可以证明麦克斯韦方程相对论性的表述形式同样具有时间倒流变换不变性以及爱因斯坦引力场方程具有时间倒流变换不变性，所以狭义及广义相对论描述的物质的变化过程具有时间倒流变换不变性。

1.5.5 热力学描述的物质的变化过程具有时间倒流变换不变性

从微观的角度看，由于每一个热力学系统都是由大量的分子或原子构成，而每一个分子或原子的运动变化过程都可以用薛定谔波动方程进行描述，而薛定谔波动方程具有时间倒流变换不变性，所以每一个原子或分子的运动变化过程都具有时间倒流变换不变性，因此相应的热力学系统也具有时间倒流变换不变性。从宏观角度看，每一个热力学系统都是一个与外界环境具有能量交换的系统，热力学系统通过热力学第一定律及热力学第二定律加以描述。某一热力学系统经过某一过程，系统从平衡态1变化至平衡态2，如果在此过程中外界对系统所做的功为 $-A$、系统从外界吸收的热量为 Q 后系统的内能从 U_1 变为 U_2，则热力学第一定律可表达为：

$$Q=U_2-U_1+A \tag{1.62}$$

即系统在任一过程中吸收的热量等于系统的内能的增量与系统对外界所做的功之和。另外，对于任何一个热力学系统，都遵循热力学第二定律：

$$S_Y-S_X\geqslant\int_X^Y\frac{\mathrm{d}Q}{T} \tag{1.63}$$

即对于系统从初态到终态的任何一个不可逆过程，热温比的积分恒小于系统终态与初态的熵值之差。其中等号适用于可逆过程，不等号适用于不可逆过程。特别的，对于一个孤立的热力学系统，系统内的任何变化都不可能导致熵的总值的减小，即有：

$$\mathrm{d}S\geqslant 0 \tag{1.63a}$$

由于功、内能、热量的计量单位是导出计量单位 $\mathrm{kg\cdot m^2\cdot s^{-2}}$，对公式(1.62)，令 $t\mapsto t'=-t$，则有：

$$Q\mapsto Q'=Q$$

$$U_2 \mapsto U_2' = U_2$$
$$U_1 \mapsto U_1' = U_1$$
$$A \mapsto A' = A$$

所以公式(1.62)即热力学第一定律具有时间倒流变换不变性。另外，根据熵的定义，熵 $dS=\frac{dQ}{T}$，显然熵的计量单位是导出计量单位 $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$，在不等式(1.63)及(1.63a)中，令 $t \mapsto t'=-t$，则有：

$$S_Y \mapsto S_Y' = S_Y$$
$$S_X \mapsto S_X' = S_X$$
$$Q \mapsto Q' = Q$$
$$T \mapsto T' = T$$

所以不等式(1.63)及(1.63a)即热力学第二定律具有时间倒流变换不变性。前面我们得到结论：在任何情况下，物体运动速度的方向都必须与物体的位移 $\vec{S}$ 的方向相同，从而物体运动速度的时间倒流变换与逆向运动的速度的意义完全不同。类似的，热力学系统熵的变化率$\frac{dS}{dt}$的变化方向也与 dS 的变化方向完全相同，从而$\frac{dS}{dt}$的时间倒流变换$\frac{dS}{d(-t)}$与$-\frac{dS}{dt}$只是在数学意义上相等，而在物理意义上则完全不相等，所以$\frac{dS}{dt}$的方向并不代表时间的方向。

我们知道，描述一维热导体的热传导过程的傅里叶方程为：

$$\frac{\partial T(X,t)}{\partial t} = -\lambda \frac{\partial^2 T(X,t)}{\partial X^2} \tag{1.64}$$

式中，函数 $T(X,t)$ 为 t 时刻在金属棒 X 处的温度；λ 为热传导系数，该系数在各种相关的教材中通常被认为是恒为正值。由于方程(1.64)中的热传导系数 λ 具有导出计量单位，其计量单位为 $m^2 \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$，即其计量单位中含有时间单位的倒数因子，这样，在对方程(1.64)进行时间倒流变换时，必须同时考虑对热传导系数 λ 的时间倒流变换（即必须考虑这里是在逆向流逝的时间中发生的过程，必须对 λ 进行重新计算）。对公式(1.64)进行时间倒流变换的方法是，令 $t \mapsto t'=-t$，则有：

$$dt \mapsto dt' = d(-t) = -dt$$

对热传导系数 λ 在倒流的时间进程中进行重新计算，有：

$$\lambda \mapsto \lambda' = -\lambda$$

方程的左边为：

$$\frac{\partial T(X,t)}{\partial t} \mapsto \frac{\partial T(X',t')}{\partial t'} = \frac{\partial T(X,(-t))}{\partial(-t)} = -\frac{\partial T(X,t)}{\partial t}$$

方程的右边有：

$$-\lambda\frac{\partial^2 T(X,t)}{\partial X^2}\longmapsto-\lambda'\frac{\partial^2 T(X',t')}{\partial X'^2}=-(-\lambda)\frac{\partial^2 T(X,(-t))}{\partial X^2}=-(-\lambda)\frac{\partial^2 T(X,t)}{\partial X^2}$$

从而方程(1.64)的时间倒流变换的形式为：

$$-\frac{\partial T(X,t)}{\partial t}=-(-\lambda)\frac{\partial^2 T(X,t)}{\partial X^2}$$

即有

$$\frac{\partial T(X,t)}{\partial t}=-\lambda\frac{\partial^2 T(X,t)}{\partial X^2}$$

由此可见方程(1.64)具有时间倒流变换不变性。

又如描述一个与外界没有相互作用的封闭空间中，有近程相互作用的稀薄气体，从非平衡态向平衡态演变过程的方程，即玻耳兹曼方程为：

$$\frac{\partial f}{\partial t}=\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{流}+\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{碰} \tag{1.65}$$

式中，$f=f(r,v,t)$ 是分布函数；r 是空间坐标；v 是分子的运动速度；$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{流}=-\left(v\frac{\partial f}{\partial r}+\frac{F}{m}\frac{\partial f}{\partial v}\right)$；$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{碰}=-\int(f_1 f-f'_1 f')u\sigma(\Omega)\mathrm{d}\Omega\mathrm{d}v_1$；$u$ 为分子的相对速度。这样，方程(1.65)还可以用以下形式表达：

$$\frac{\partial f}{\partial t}=-\left(v\frac{\partial f}{\partial r}+\frac{F}{m}\frac{\partial f}{\partial v}\right)+\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{碰} \tag{1.65a}$$

对于方程(1.65a)，令 $t\longmapsto t'=-t$，则方程的左边为：

$$\frac{\partial f}{\partial t}\longmapsto\frac{\partial f'}{\partial t'}=\frac{\partial f}{\partial(-t)}=-\frac{\partial f}{\partial t}$$

方程的右边为：

$$\begin{aligned}-\left(v\frac{\partial f}{\partial r}+\frac{F}{m}\frac{\partial f}{\partial v}\right)+\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{碰}\longmapsto&-\left(v'\frac{\partial f'}{\partial r'}+\frac{F'}{m'}\frac{\partial f'}{\partial v'}\right)+\left(\frac{\partial f'}{\partial t'}\right)_{碰}\\&=-\left((-v)\frac{\partial f}{\partial r}+\frac{F}{m}\frac{\partial f}{\partial(-v)}\right)+\left(\frac{\partial f}{\partial(-t)}\right)_{碰}\\&=\left(v\frac{\partial f}{\partial r}+\frac{F}{m}\frac{\partial f}{\partial v}\right)-\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{碰}\end{aligned}$$

显然等式仍然成立，即玻耳兹曼方程具有时间倒流变换不变性。

在统计物理学中，H 函数是非常重要的一个函数，其表达式是：

$$H=\int f\ln f\mathrm{d}v \tag{1.66}$$

式中，v 是分子的运动速度，则 H 函数随时间的变化按以下方式进行：

$$\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}=\int(1+\ln f)\frac{\partial f}{\partial t}\mathrm{d}v \tag{1.67}$$

经理论证明有：$\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}\leqslant 0$。

在式(1.66)中，令 $t\mapsto t'=-t$，则有：

$$\int f\ln f\mathrm{d}v\mapsto\int f'\ln f'\mathrm{d}v'=\int f\ln f\mathrm{d}(-v)=-\int f\ln f\mathrm{d}v$$

即

$$H\mapsto H'=-H$$

则(1.67)式的左边有：

$$\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}\mapsto\frac{\mathrm{d}H'}{\mathrm{d}t'}=\frac{\mathrm{d}(-H)}{\mathrm{d}(-t)}=\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}$$

(1.67)式的右边有：

$$\begin{aligned}\int(1+\ln f)\frac{\partial f}{\partial t}\mathrm{d}v\mapsto&\int(1+\ln f')\frac{\partial f'}{\partial t'}dv'\\=&\int(1+\ln f)\frac{\partial f}{\partial(-t)}\mathrm{d}(-v)\\=&\int(1+\ln f)\frac{\partial f}{\partial t}\mathrm{d}v\end{aligned}$$

由此可见式(1.67)具有时间倒流变换不变性，所以$\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}\leqslant 0$ 同样具有时间倒流变换不变性。这里的结论与上面经典力学描述的物质变化过程的时间倒流变换的结论完全一致，看似与热力学中的不可逆系统具有时间反演变换对称性破缺的结论相矛盾，即与热力学系统熵的变化永远是增大的(热力学系统变化过程的逆过程中，系统的熵是减小的而且是不可能发生的)并把该方向作为时间的箭头这一结论相矛盾，其实这里涉及的是完全不同的两个概念，一种是时间倒流变换，而另一种是时间反演变换，人们通常所说的时间反演变换其实是变化过程的反向变换，通过比较两种变换的实际操作方法可以发现两者是完全不同的，也就是说方程(1.67)具有时间倒流变换不变性，但不具有时间反演变换不变性(即该变化过程具有不可逆性)，所以这里不存在任何矛盾。由此可见，通常人们所谓的时间反演变换其实是变化过程的反向变换。

通过以上的讨论可见，时间反演变换与时间倒流变换是两个完全不同的概念与方法，时间反演变换是用于研究物质变化过程的可逆性或者是用于研究描述物质变化过程的物理方程关于物质变化过程对称性的最重要的方法，而时间倒流变换则是研究物质变化过程关于时间对称性的重要方法。在关于时间的两种分立对称性变换即时间反演变换及时间倒流变换中，导致变化过程逆转而非导致时间反

方流逝的时间对称变换是时间反演变换，而不可能导致变化过程逆转的时间对称变换则为时间倒流变换。图 1-23 是将物理量 $K=K(t)$ 进行时间的两种分立对称变换后，分别得到的关于其时间反演变换的物理量 $K'=K(-t)$（假定物理量 K 对时间反演变换具有偶性）及关于其时间倒流变换的物理量 $K''=K(-t)$，图 1-23 中物理量 $K=K(t)$ 的两个量值 $K(t_1)$ 及 $K(t_2)$ 经过时间的两种分立对称变换后分别得到关于时间反演变换的量值 $K'_1=K(-t_1)$ 及 $K'_2=K(-t_2)$ 和关于时间倒流变换的量值 $K''_1=K(-t_1)$ 及 $K''_2=K(-t_2)$，从图 1-23 中可见，时间反演变换与时间倒流变换之间存在的明显区别。图 1-23 中的①为时间反演变换，显然①中的物理量 $K=K(t)$ 经过时间分立对称变换得到的变化过程是原变化过程的逆过程，即物理量 $K=K(t)$ 的时间反演物理量 $K'=K(-t)$ 从量值 $K'_2=K(-t_2)$ 到量值 $K'_1=K(-t_1)$ 的变化过程发生的方向与原物理量 $K=K(t)$ 从量值 $K(t_1)$ 到量值 $K(t_2)$ 的变化过程发生的方向完全相反，特别是物理量 $K=K(t)$ 在其任何一个点上的微分 $\mathrm{d}K$ 与其反演物理量 $K'=K(-t)$ 相对应的反演点上的微分 $\mathrm{d}K'$ 的符号相反，即 $\mathrm{d}K'=-\mathrm{d}K$。从图 1-23 中可见，对其进行时间反演变换前与变换后物质变化过程发生的方向显然关于时间轴的原点是不对称的，即时间反演变换并未导致反演变化过程时间的倒流，物理量 $K=K(t)$ 的时间流逝方向是从时刻 t_1 到 t_2，其反演物理量 $K'=K(-t)$ 的时间流逝的方向为从时刻 $-t_2$ 到 $-t_1$，并没有因为时间反演变换而发生变化。图 1-23 中的②为时间倒流变换，显然②中的物理量 $K=K(t)$ 经过时间分立对称变换得到的变化过程其方向与原变化过程完全相同，即物理量 $K=K(t)$ 的时间倒流物理量 $K''=K(-t)$ 从量值 $K''_1=K(-t_1)$ 到量值 $K''_2=K(-t_2)$ 的变化过程的方向与原物理量 $K=K(t)$ 从量值 $K(t_1)$ 到量值 $K(t_2)$ 的变化过程的方向完全相同，从而时间倒流变换并不会像时间反演变换那样导致变化过程的逆转。在时间倒流变换中唯一与原变化过程不同之处在于变换后得到的变化过程是在时间倒流进程中进行的，特别是物理量 $K=K(t)$ 在其变化曲线上任何一个点上的微分 $\mathrm{d}K(t)$ 与其时间倒流变换物理量 $K''=K(-t)$ 相应的对称点上的微分 $\mathrm{d}K''$ 的值完全相等，即 $\mathrm{d}K''(-t)=\mathrm{d}K(t)$。必须指出的是，$\mathrm{d}K''(-t)$ 是 $K''(-t)$ 相对于时间 t 的反方向即负时间轴 $-t$ 的微分，从图 1-23 中②可见，$K''(-t)$ 与 $K(t)$ 关于 $t=0$ 对称轴完全对称，但变化过程的方向则没有任何变化，如物理量 $K=K(t)$ 从 $K_1=K(t_1)$ 到 $K_2=K(t_2)$ 方向的变化与物理量 $K''=K(-t)$ 从 $K''_1=K(-t_1)$ 到 $K''_2=K(-t_2)$ 方向的变化是完全相同的、没有任何差异的，这一点与上述所有结论完全一致。

上面讨论的时间倒流变换是以时间坐标轴上特殊的时间值 $t=0$ 为对称轴将物质的变化过程所作的对称变换，与在数学上实现变化过程的逆转的情况类似，对某一物理量的变化过程在数学上实现时间倒流的变换，同样可以在任何时间区域

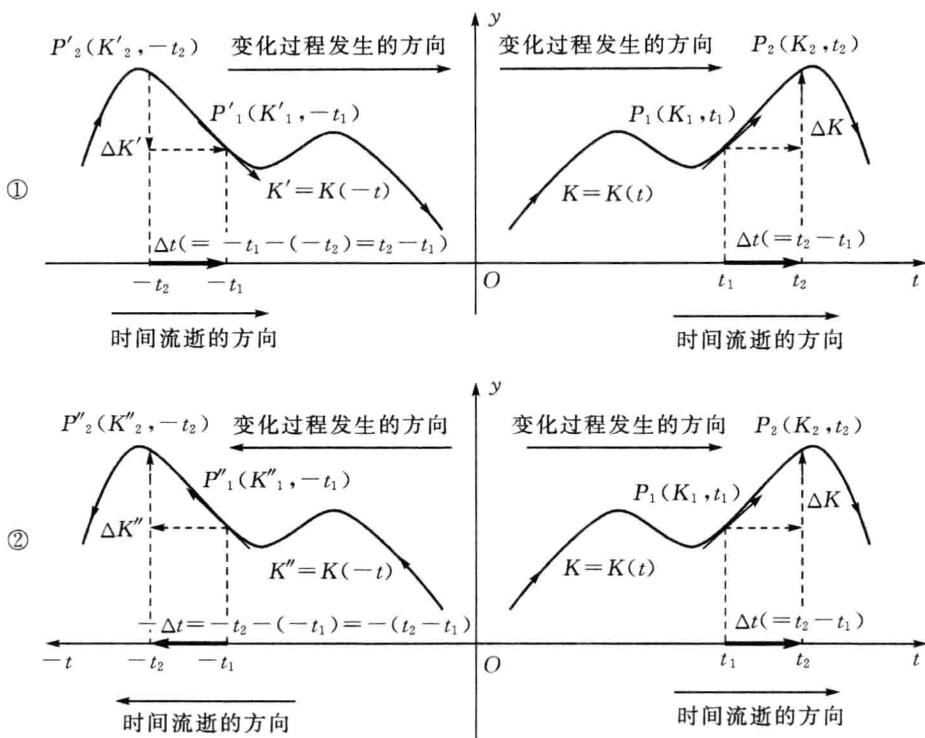


图 1-23　物理量 $K(t)$的变化过程的时间反演变换及其时间倒流变换之间的区别

(过去的及未来的时间区域)进行,即可以对任意的一个时刻值 $t=t_0$(假定 t_0 是现在所对应的时刻,显然 t_0 可以是任意的实数)为对称轴对描述物理量 $K(t)$变化过程的曲线进行对称变换,得到的新的物理量 $K'=K(2t_0-t)$(或 $K''=K(2t_0-t)$)变化的曲线,同样是物理量 $K(t)$变化过程的时间倒流变换,即相当于直接将物理量 $K(t)$中的时间 t 用 $2t_0-t$(而非 $-t$)代换,而且与以 $t_0=0$ 为对称轴的时间反演变换所得到的变化过程完全等效,由此获得的各种结论也必定与时间倒流变换的情况完全相同;显然,原变化过程是在正向流逝的时间中发生的,而其逆过程则是在逆向流逝的时间中发生的,只是这种方法较为复杂而通常不被采用,如图 1-24 及图 1-25 所示。而由于描述变化过程的物理方程在时间倒流变换前与变换后的形式完全相同,所以我们无法从任何实验中发现时间的倒流进程,从图中可见对其进行时间倒流变换前与变换后物质变化过程发生的方向显然关于时间轴原点是对称的。一般的,由于所有描述物质变化过程的物理方程(无论是普通的方程还是微分方程)均是等式,等式两边的物理量不仅量值相等,而且计量单位也完全相等,从而

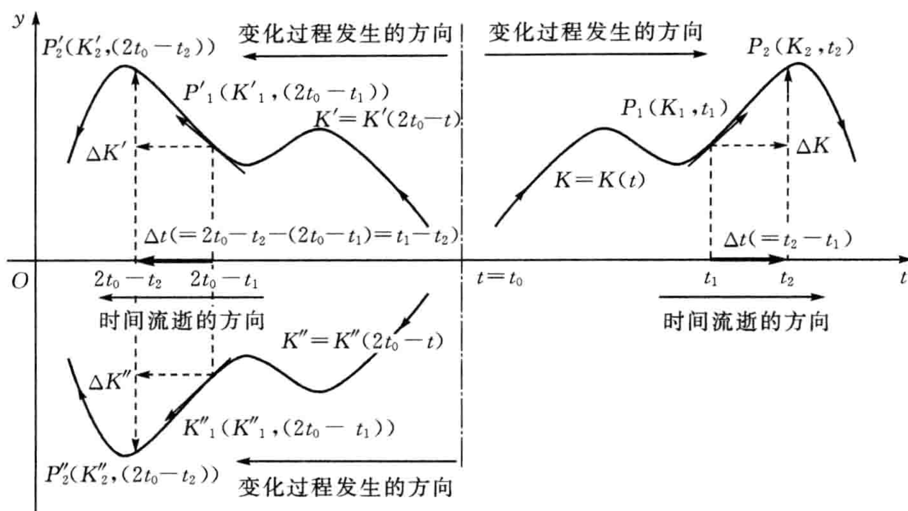


图 1-24 物理量 $K(t)$ 以 $t=t_0$ 为对称轴向“过去”所作的时间倒流变换

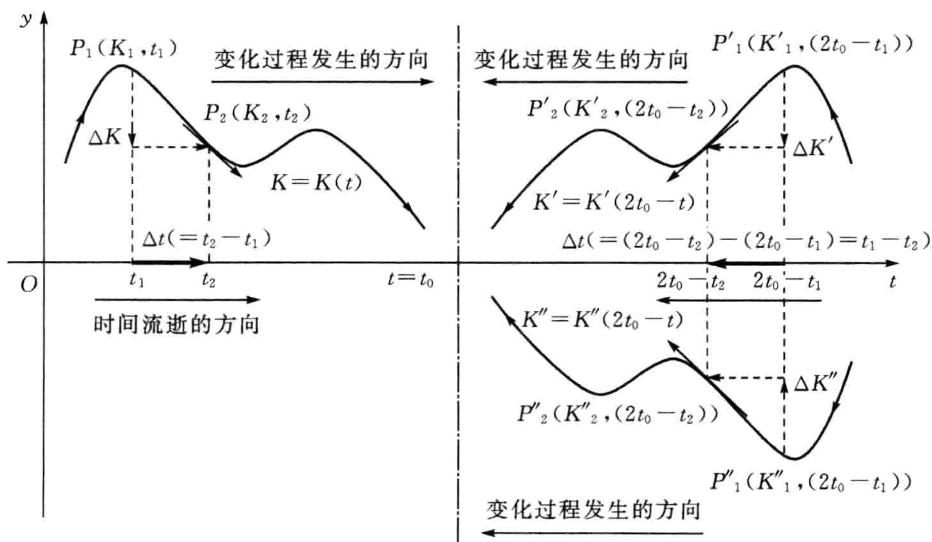


图 1-25 物理量 $K(t)$ 以 $t=t_0$ 为对称轴向“未来”所作的时间倒流变换

其计量单位中的时间因子的幂次数也完全相等，所以一切物理方程都具有时间倒流变换不变性。综合上面所有的讨论可以得出结论：一切事物的变化过程都具有时间倒流变换不变性，也就是说时间的逆向流逝对一切物质的变化过程都没有任

何影响。所以时间倒流变换不变性实际上意味在任何参照系中都不可能发现时间的逆向流逝,时间正向流逝的参照系中的观察者所观察到的现象,与时间逆向流逝的参照系中的观察者所观察到的现象完全相同,即时间逆向流逝的参照系中的观察者通过任何物理实验都不可能发现时间的逆向流逝,正如在任何参照系中的观察者通过物理实验都不可能发现本参照系中的时钟变慢的情况一样。由于我们只能借助物质的周期性变化过程来测量、记录时间,而如果时间的倒流真实地发生了,那么由上述讨论的结果我们可以获得结论,即时间的倒流不可能导致物质的运动过程或者物质的变化过程的反向,也不可能导致顺时针旋转的时钟变为逆时针旋转的时钟(或者不可能导致任何时钟进入倒计时),这也就意味在即使是在时间发生倒流的情况下,顺时针旋转的时钟不会有任何异常情况出现,而这种情况下任何物理方程的形式都与时间正向流逝时的情况完全相同,即时间的逆向流动与时间的正向流动对任何描述物质变化过程的物理方程也对相应的物质变化过程而言没有任何区别,所以谈论时间流动的方向性(或者赋予时间正负号)没有任何意义。既然我们借助任何测量手段都无法确定时间流动的方向,那么把方向性赋予时间就是多余的,所以我们可以认为时间没有方向性,时间的方向性是我们虚构的、强加给时间的一种性质。因为任何事物的流动性都具有(哪怕是局部的)方向性,这也就意味着方向性是流动性的必要条件,而时间的流动却没有方向性,这也就意味着时间是不具有流动性的,或者说时间是“静止不动的”。因为时间的正负号没有意义,从而对物质的变化过程而言,只有时间的长短或者时间的绝对值才有意义。

1.6 一切复杂的物质系统的变化过程本身就具有不可逆性

物质变化过程的逆过程在前面已经有过定义,简单地说一个物质变化过程的逆过程就是把该物质变化过程的全程录像(或影片)进行回放后所能看到的变化过程,在进行本节的讨论之前,我们需要先明确物质变化过程的不可逆性的概念。所谓物质系统变化过程的不可逆性,是指如果某物质系统从状态 A 到状态 B 的变化过程能够自发地发生,而该变化过程的逆过程即物质系统从状态 B 到状态 A 的变化过程完全不可能自发地发生或自发发生的几率非常小,那么我们就说从状态 A 到状态 B 的变化过程是不可逆的。在热力学中,物质变化过程的不可逆性严格的定义可以表述为:如果一个物质的变化过程不能够逆向进行使系统与外界都恢复到变化前的状态而不会引起任何其他变化,则称该变化过程为不可逆的变化过程。确切地说对于一个由状态 A 到状态 B 的物质变化过程(即 $A\Rightarrow B$),如果其逆向变化过程(即 $B\Rightarrow A$)即使能使系统恢复到状态 A,但无论如何也无法消除原过程对周围环境引起的变化,从而使其也恢复到原来的状态而不产生任何其他影响,则该

变化过程($A\Rightarrow B$)是不可逆的变化过程。以上的物质变化过程的不可逆性的定义是从热力学角度进行的,而从描述变化过程的物理方程关于变化过程的对称性而言,也可以把物质变化过程的不可逆性定义为:如果描述物质系统从状态 A 到状态 B 的物理方程不具有时间反演变换不变性,那么我们就称该物质系统的变化过程是不可逆的,我们把物质系统从状态 B 到状态 A 的变化过程称做物质系统从状态 A 到状态 B 的变化过程的逆过程。

我们知道,现实世界中有些变化过程的逆过程是可以允许发生的,而多数变化过程的逆过程都是不可能发生的,这一点从把某一变化过程的全程录像(或影片)进行回放所看到的变化过程可以清楚地了解到,或者可以通过对描述相应变化过程的物理方程关于时间反演变换的对称性进行详细的研究。变化过程的不可逆性的实例比比皆是:任何人从出生开始必然要经历婴儿、童年、少年、青年、中年、老年最终到死亡的变化过程,其逆过程为:已故之人从坟墓中爬起到成为老年、中年、青年、少年、童年、婴儿的变化过程,该逆过程显然是绝对不可能发生的;火柴被点着很短时间内被燃烧成灰烬的变化过程,其逆过程为:灰烬自发产生火苗、不一会火柴一点一点地从火苗中产生出来,直至整根火柴出现后火苗随即熄灭,该逆过程显然是不可能发生的;一瓶放在课桌上的墨水瓶掉到水泥地上,导致墨水瓶被打碎,墨水及玻璃碎片撒了一地的变化过程,其逆过程为:被打碎的墨水瓶的玻璃碎片自动复原的同时,洒在地上的墨水自动聚集并进入墨水瓶后又跳回到桌面上,该逆过程显然是不可能发生的;一些气体被从一个容器的一个角上的小孔导入到该容器中,这一变化过程的逆过程是:一个容器中的所有的分子全部自发聚集到容器的一角,经过统计物理学的计算,经计算该逆过程发生的几率非常小以至于几乎不可能发生;正在弹跳的篮球其弹跳高度会随着时间的增加逐渐减小直至最终静止在地面上的变化过程,其逆过程为:静止于地面上的篮球突然从地面上自动弹起而后越弹越高,该逆过程显然是不可能发生的;咖啡杯中的咖啡液体随着调羹在杯中的搅动会在杯中旋转起来,而当调羹停止搅动后旋转的咖啡液体会逐渐静止下来这一变化过程,其逆过程为:咖啡杯中的咖啡液体从静止状态突然开始旋转起来,该逆过程显然是不可能发生的;水流从高山上流下形成瀑布最后注入山涧的深潭中这一变化过程,其逆过程为:深潭里的水突然聚集起来并形成一股水柱而后冲上高山上,该逆过程显然是不可能发生的;一块石头被抛入池塘中后会产生以石头下落点为圆心逐渐向外传播的一圈圈的圆环形水波这一过程,其逆过程为:从池塘的四周突然出现一圈圈的水波向池塘中的一点聚拢,最终一块石头从这一点上跳出来并落到池塘的岸边,显然,该逆过程是不可能发生的。凡此等等,这样的实例我们还可以无限制地列举下去。实际上,现实世界中的任何微观的、宏观的以及宇观的物体与其周围的环境的构成都是极其复杂的,我们的理论无法穷尽其全部要素的物

质系统，因此其变化过程都具有不可逆性，而所谓的可逆性只是物理理论中抽象的物质对象及其理想的变化过程才具有的性质。

1.6.1 经典物理学对变化过程的可逆性描述

与物质变化过程的不可逆性相反，物质变化过程的可逆性可以定义为：如果一个物质系统的变化过程可以逆向进行，使系统与外界都恢复到原先的状态而不会引起任何其他变化，则称该变化过程为可逆的变化过程。更确切地说，对于一个由状态 A 到状态 B 的物质系统的变化过程（即 A⇒B），如果其逆向变化过程（即 B⇒A）能使系统从状态 B 恢复到状态 A，同时也消除了原过程（即 A⇒B）对周围物质环境引起的变化（如果发生了该种变化），从而使其也恢复到原来的状态而不产生任何其他影响，则该变化过程（A⇒B）是可逆的变化过程。

据此定义，所谓变化过程的可逆性是指如果在一定条件下某物质对象从状态 A 到状态 B 的变化过程可以用物理方程 $F(x,y,z,t)=0$ 进行描述，而在相同的条件下该物质对象从状态 B 到状态 A 的变化过程同样可以用物理方程 $F(x,y,z,t)=0$ 进行描述，也就是说某物质对象从状态 A 到状态 B 的变化过程及从状态 B 到状态 A 的变化过程都是物理方程 $F(x,y,z,t)=0$ 所允许的变化过程，确切地说物质对象从状态 A 到状态 B 的变化过程及从状态 B 到状态 A 的变化过程都是物理方程 $F(x,y,z,t)=0$ 的解，那么我们就称该物质对象的变化过程是可逆的变化过程，简称变化过程具有可逆性，我们用状态 A⇔状态 B 表示某一物质变化过程的可逆性。在物理学中判断某一物质变化过程可逆性的基本方法是根据时间反演变换的定义，如果描述某一变化过程的物理方程具有时间反演变换不变性，则可以判断该物质变化过程具有可逆性。具体的，在物理学中通常是通过对描述物质变化过程的物理方程进行时间反演变换后，比较该物理方程，在以时间轴的坐标原点为对称中心的两个时刻 t 及 $-t$ 形式上的异同，而对相应的变化过程的可逆性进行判断的。如果描述某一物质变化过程的物理方程，在以时间轴的坐标原点为对称中心的两个时刻 t 及 $-t$ 形式完全相同（从而量值必然相同），则表明在相同的条件下该物质变化过程发生逆转时可以完全对称的再现原过程，也就意味着该物理方程所描述的物质变化过程具有可逆性，否则相应的物质变化过程具有不可逆性。

在此需要指出的是，某一物质的变化过程具有可逆性并非意味着这一过程的逆过程可以随时地、无条件地发生，而是意味着该变化过程与其逆过程一样都是被描述变化过程的物理方程所允许的，在一定条件下都是可以发生的过程；而某一物质的变化过程具有不可逆性也不意味着变化过程的逆过程在任何条件下都不可能发生，而是意味着不能够用描述该变化过程的物理方程描述其逆过程。据此定义及结合上面我们关于经典物理学具有时间反演变换不变性的结论，可以得到如下

结论:包括牛顿力学、狭义及广义相对论力学、经典电磁场理论等在内的经典物理学所描述的物质的变化过程都具有可逆性。比如一个物体可以沿 X 轴的正方向相对于坐标原点以速度 V 作匀速直线运动,同样的该物体也可以沿 X 轴的负方向相对于坐标原点以速度 $-V$ 作匀速直线运动,这两种运动都是牛顿力学允许的运动方式。又比如太阳系的行星绕太阳以椭圆轨道的运行,既可以是顺时针的也可以是逆时针的,这两种运行方式均是牛顿力学及广义相对论所允许的。行星之所以以当前的形式运行,完全不是因为牛顿力学及广义相对论不允许相反的运行形式发生,而是由太阳系形成之前的所谓初始条件所决定的。

需要指出的是,牛顿力学体系中把被研究的运动物体的环境对其产生的作用都归结为作用力(如弹力、拉力、重力、摩擦力等),而所有这些力在牛顿力学体系看来本质上都是一样的,即都会导致物体的运动状态发生变化或产生变化的趋势,这些变化都能够用牛顿第二定律进行描述。我们知道,牛顿第二定律(甚至包括牛顿力学的三大定律)具有时间反演变换不变性,这就说明从牛顿力学的角度看来,一切物体的运动变化过程都是可逆的过程,包括我们在前面列举的如任何人从出生开始必然要经历婴儿、童年、少年、青年、中年、老年最终到死亡的变化过程,火柴被点着不到一会时间火柴被燃烧成灰烬的变化过程等均是可逆的变化过程。但我们知道,实际上所有这些变化过程恰恰是完全不可逆的,牛顿力学应用于实际的物质变化过程中之所以会产生这样错误的主要原因,在于用牛顿力学对物体的变化过程的描述过程中没有考虑(由分子、原子构成的)环境对物体的耗散作用等复杂的相互作用,而统统把所有的环境对所研究的物体的作用都归结为力,而正是这种物质系统之间的相互作用在无数微观粒子之间的平均分配导致了变化过程的不可逆性。由此可见,正是由于牛顿力学把所有外界对物体的作用不加区分地抽象为力,从而掩盖了对变化过程的不可逆性起重要作用的摩擦力的耗散性本质,从而导致了牛顿力学对物质的变化过程本质描述的偏离。其实不单是牛顿力学,甚至包括电磁学、量子力学及相对论等理论在对物质对象及其变化过程进行描述时,都进行了最大限度地抽象,特别是忽略了物质对象的环境与物质对象之间的复杂的相互作用,成为真正抽象的物质对象,正是对于这种抽象的物质对象,描述其变化过程的物理方程才具有时间反演变换不变性,从而相应的物质的变化过程具有可逆性,而根据前面的讨论我们知道,这里所说的变化过程的可逆性完全是在同一个时间流逝方向上的变化过程的可逆性,与时间本身的可逆性完全无关。如果把这些抽象的物质对象放到它们所处的实际环境中,那么这些物质的变化过程由于物质对象与其环境之间存在的复杂的相互作用,从而都将具有不可逆性,这就是现实世界中的一切物质的变化过程都具有的不可逆性。

1.6.2 热力学系统具有变化过程的不可逆性

前面我们借助时间反演变换的方法，详细讨论了描述简单的热力学系统变化过程的方程，特别是表征热力学系统变化过程状态的态函数熵 S 随时间单调性增加的表述关于时间反演变换的对称性破缺，从而证明了热力学系统的变化过程具有不可逆性。而在科学发展的历史上，热力学系统变化过程具有不可逆性的特征，则是众多科学家通过对包括蒸汽机在内的热机技术的研究过程中发现的，而在相应地研究过程中，包括描述热力学系统变化过程的不可逆性的热力学第二定律在内的整个热力学唯象的、宏观的理论体系被逐渐建立起来，而通过对热力学现象的微观本质的深入细致探究，热力学宏观理论体系的最重要内容——热力学第一及第二定律完全可以借助统计物理学推导出来，热力学最终建立在统计物理学的坚实基础之上。

19 世纪的工业革命使得蒸汽机技术在西方社会得到了广泛的应用，而伴随着蒸汽机技术的应用，其固有的低效及笨重的弱点充分暴露出来，如果蒸汽机的这些缺点不被克服，就将严重制约蒸汽机在工业生产中的广泛应用，而正是由于社会的强烈需求，促使从事蒸汽机工程技术职业的技术人员对蒸汽机提出进一步改进的方向，不仅要求其对外能够产生越来越大的作用力，而且要求其具有更高的效率。而要进一步提高蒸汽机的效率，就必须对蒸汽机中最重要的物质对象——蒸汽——在蒸汽机工作过程中的吸收热量→温度上升→进入缸体中绝热膨胀→推动活塞对外做功→从缸体中排除进入冷却装置放热→温度下降→体积收缩等热现象的变化规律进行探索及研究，正是在对热机中的工作介质如蒸汽在热机工作过程中的状态参数(如压强 p、体积 V、温度 T)的变化规律，以及这些参数之间存在的数学关系的研究中，热力学理论逐渐从对热机的研究中独立成为一门学科。1824 年法国工程师卡诺在对热机的数学模型——卡诺机(其中最重要的过程被后人称做卡诺循环)的理论研究过程中发现，卡诺机在对外做功过程中，其工作介质(如蒸汽机中的蒸汽)都必须经过：吸热温升体积膨胀、对外做功、冷却降温体积收缩，从而使热机恢复到其初始的热力学状态，为再次对外做功作准备，这样一个变化过程，而卡诺机要实现如此的变化过程必定需要高温热源和低温热源两个热源。另外，卡诺在对卡诺机的研究过程发现，卡诺机(包括蒸汽机)的效率与卡诺机的工作介质(如蒸汽)的类型无关，而只取决于卡诺机的两个热源之间的温度差，由此发现了进一步提高蒸汽机效率的途径：即提高卡诺机的两个热源之间的温度差。另外，卡诺研究的一个重要结论是：在所有工作于相同的高温热源及相同的低温热源的热机中，以工作介质在气缸内体积的变化过程无限缓慢的可逆热机的工作效率最高，其效率正比于两个热源之间的温差。我们知道，可逆热机是理想的、效率最高

的热机，而任何实际的热机都是不可逆热机，因此效率必定低于可逆机，这也就是说所有的蒸汽机存在效率上限。卡诺对卡诺机的研究在理论上指出了提高热机效率的重要途径：这就是说要提高热机的效率，必须尽可能地提高热机的两个热源之间的温度差。后来的发明家们陆续发明出效率更高、体积更小的，如将燃气与空气混合压缩并在恰当的时机点火的内燃机、利用燃烧发热量极高的燃料直接驱动的燃气涡轮机等，其他几种效率非凡的热机都是在卡诺机理论的基础上研制出的。

随着效率越来越高的热机的出现，热机在人类生产实践的各方面开始有了日益广泛的应用，但人们发现所有的热机在工作过程中都必须消耗燃料对热机内的工作介质进行加热，使高温热源的温度升高，从而与低温热源产生温差，而卡诺机理论并未对如何使热机的两个热源形成温差给予任何提示，有些发明家们因此联想到是否能够发明不需要消耗任何燃料或能量的动力机械——永动机，并提出了许多巧妙的实现方案。虽然这些永动机的设想非常巧妙，但最终都被证明是无法成功的，主要原因在于这些构想出的永动机可以分为两大类，其中一类违反了物理学中最基本的定律——能量守恒定律，另一大类则违反热力学第二定律。能量守恒定律在热力学中也被称做热力学第一定律，其内容是：能量既不能产生也不能消失，只能从一个物体转移到另一个物体上或者从一种形式转化为另一种形式而其总量不变。将能量守恒定律应用于热机中则意味着如果热机不从环境中吸收热量，就无法实现对外做功。显然热力学第一定律仅仅从量上对任何一个物质的变化过程进行限制，而没有对其发生的方向有任何限制，特别是没有对物质变化过程中热与功的相互转换有任何限制，没有（当然也不可能）对能量与系统的内能进行严格区分（正如牛顿力学中没有对力与摩擦力进行严格的区分一样）。而实际上有许多热力学过程即使可以遵循能量守恒定律也从未发生过，如两个温度不同的物体相互接触，即使确保能量的守恒，也从未发生过高温物体温度变得更高、低温物体温度变得更低的现象；另外，通过广泛实验，科学家们发现任何形式的功都可以完全转化为热，但与之相反的过程，即热可以完全转化为功却不会发生，因为在热转化为功时总有一部分热量会被浪费掉。如热推动蒸汽机的活塞来回运动时，并非所有热都会转化为对活塞的做功，总有一部分热传导至与之接触的活塞、缸体以及与这些部件有刚性连接的热机的其他部件并使这些部件温度升高，最终导致热机周围的空气温度的上升，而当热机停机后，仍然会有一部分热量保留在冷却水的水滴中；特别的热质在推动活塞运动过程中，活塞与缸体之间由于存在摩擦阻力，从而使得一部分机械能转化为热量，这一热量又会导致活塞及缸体温度的上升从而与环境形成温差，这样又会有一部分热量被传递到热机周围的环境中完全耗散掉。这就意味着热机在工作过程中的热量损失是不可逆的，热机一旦有一部分热量损失掉就不可能再转变为功。这里提到的变化过程显然都具有明确的方向性。

后来的科学家在卡诺对卡诺机研究结论的基础上，结合能量守恒定律对热机的热—功转化过程进行了更加深入的研究，提出涵盖卡诺定理在内的更具普遍意义的结论：热—功转换过程不可避免地伴随着热的耗散，所有热机都不能够从单一热源吸取热量而后使其全部转化为功而不引起任何变化。与之等效的表达还有：不可能把热量从低温物体传到高温物体而不引起其他任何变化，这就是著名的热力学第二定律。热力学第二定律还有许多其他等价的表述。而其他一切相关现象都证明，热转化为功都是有条件的；而功转化为热则是自发的、无条件的。如人对放置在水平地面上的物体做功后物体在力的方向上产生位移，物体在发生位移过程中显然会受到地面对物体的摩擦力，具体表现为物体与地面的接触面上会发热。又如人用气筒给车胎打气过程中，会对封闭在气筒中的气体做功，显然人对气筒中的气体所做功的一部分使气体压缩，另一部分则由于活塞在移动过程中与气筒壁的摩擦产生热量，使气筒壁发热、发烫。钻木取火同样由于钻头在转动过程中对木头做功，使得钻孔越来越深，同时由于钻头在转动过程中受到木头对钻头的摩擦力使木头发热最终起火，这里钻头对木头所做的功中有一部分功显然自发的转化为热量等。所有这一切实例都证明了功转化为热是自发的、无条件的，而相反的过程即全部的热转化为功（如热机的工作）则不能自发的产生，这也就意味着这些变化过程是不可逆的。

为了对各种热机中的不可逆过程的本质特点进行简单、统一的研究，德国科学家克劳修斯引入了一个与变化路径无关的状态函数——熵的概念。在热力学中，熵被定义为表征热力学系统的平衡态的状态函数（用 S 表示），并将其与物质变化过程的不可逆性联系起来，其特点是在耗散系统中系统的熵值不断地增加，当系统已经没有进一步做功的潜力时，熵的量值则达到最大值。“熵”这一名称是克劳修斯由希腊语得到启发发明出来的，其意义是“转移的量”或“发生变化的能力”，是热力学中最重要的概念。对于平衡态的热力学系统，该系统从状态 A 到状态 B 的变化，可以用态函数熵 S 进行相应的描述，即 $S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T}$，如果假定该热力学系统从状态 A 到状态 B 的变化过程是一个无限小的过程，即假定 $S_B - S_A = dS$，则显然有 $dS = \frac{dQ}{T}$。把态函数熵 S 的表达式用于卡诺定理可以得到一个非常重要的结论，该结论也可被看做是热力学系统的不可逆过程的科学表述：在任意一个孤立的热力学系统中，任何变化都不可能导致系统的熵的总量值减少，即 $dS \geqslant 0$。特别的，如果 $dS = 0$，则相应的变化过程是可逆的；如果 $dS > 0$，则相应的变化过程是不可逆的，这就是热力学第二定律最常见的一种表述方式。这一结论同样可以从热力学系统的态函数熵 S 对时间的导数 $\frac{dS}{dt}$ 导致时间反演变换的对称性破缺的事实

中得出，相应的讨论我们在前面已进行过，在此不再叙述。热力学第二定律的该种表述，既提供了对孤立系统中自发不可逆过程的方向的判断方法，即不可逆过程总是向着熵增大的方向进行；又提供了确定不可逆过程限度的判断准则，即所有自发发生的变化过程都是由非平衡态向平衡态变化的过程，而一旦达到平衡态时相应的变化过程就停止了，这就意味着系统在平衡态时其熵为极大值；同时，还提供了变化过程是否可逆的判断标准：即熵不变(即 $dS=0$)则变化过程是可逆的，熵增大(即 $dS>0$)则相应的变化过程是不可逆的。根据热力学第二定律还可以知道，任何一个热力学系统随着其熵的增加，该系统对外做功的能力会逐渐减弱，这就意味着熵还可以作为热力学系统对外做功能力的衡量指标。根据热力学第二定律的结论以及描述热力学现象的物理方程，都具有时间反演变换对称性破缺的事实，可以判定自然界中所有实际发生的、与热现象关联的物质的自发的变化过程都是不可逆的。多数科学家通常认为："按照第二定律，在一个孤立系统中自然发生的任何过程，都一定伴随着系统的熵增加，因而熵对所有孤立的热力学系统提供了一个时间箭头。当熵达到它的极大值时，孤立系统的时间演化就停止了，该系统就处于它最无序的状态。这时系统已经耗尽了它所有发生变化的能力——它已经达到了热力学平衡[①]。"结合我们前面的讨论可以看出，这里所谈论的热力学系统变化过程的不可逆性显然是物质变化过程本身的不可逆性，而非时间的不可逆性或单向性。因为所说的不可能发生的熵减小的热力学系统变化过程与熵增大的热力学变化过程同样是在同一时间流逝方向上的过程，这样的变化过程显然不可能为时间提供一个所谓的箭头。

热力学理论通过在对现实世界中热力学现象的研究过程中，虽然获得了非常重要的科学结论(其中包括热力学第一定律及第二定律)，但所有这些结论在热力学中的表述形式都是宏观的、唯象的，即完全使用热力学系统的工作介质的压强 p、体积 V、温度 T、内能 E 等宏观意义上的状态参数及与外界所交换的热量 Q 及功 W 等所进行的描述，从而在热力学中不可能对所有热力学现象的不可逆性的本质进行解释。而要真正地、完全地理解热力学现象的不可逆性，就必须从热力学现象的微观本质入手。如19世纪的物理学家在英国科学家道尔顿的原子学说的基础上提出了分子运动学说，认为所有宏观的物质系统都是由大量分子(或原子)组成的；所有分子(或原子)都在不停地作无规则运动，运动的剧烈程度与物体的温度有关；分子之间存在相互作用力，这种作用力与分子之间的距离有关，当分子之间的距离达到一定值时，分子之间的作用力呈现相互的吸引力(如液体情况)；而当分

① [英]彼得·柯文尼，罗杰·海菲尔德.时间之箭——揭开时间最大奥秘之科学旅程[M].江涛，向守平，译.长沙：湖南科学技术出版社，1995：147.

子之间的距离小于一定值时，分子之间呈现相互的排斥力（如固体的情况），这种情况下物体表现出不可压缩性；而当分子之间的距离大于一定值时，分子之间的作用力非常小从而可以忽略不计（入气体的情况），这种情况下物质表现出可压缩性。科学家们从分子运动论角度揭示了热力学系统的物理量，如压强 p 与分子的平动动能之间的关系式为 $p=\frac{1}{3}nm\overline{v^2}=\frac{2}{3}n\bar{E}$，其中 n 为单位体积内的分子数，m 是分子的质量，$\bar{v}$ 是分子的平均运动速度，$\bar{E}$ 为分子的平均平动动能。又如热力学系统的温度 T 与分子的平动动能之间的关系式为 $\bar{E}=\frac{3}{2}kT$，其中 k 为玻耳兹曼常数，T 为宏观物体的温度。这就是说热现象本质是分子的运动，分子运动的剧烈程度是热力学系统的温度的量度，分子运动速度越高，系统的温度越高。

麦克斯韦于 19 世纪 50 年代借助概率论的方法从理论上推导出非常重要的气体分子的数目按速率分布的规律：当气体处于平衡态时，分布在任一速率间隔 v—$v+\mathrm{d}v$ 内的分子数的比率是 $\frac{\mathrm{d}N}{N}=4\pi\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}}\mathrm{e}^{-\frac{mv^2}{2kT}}v^2\mathrm{d}v$，该分布规律在后来的科学实验中被证明是完全正确的。麦克斯韦借助概率论的方法导出的分布规律，是基于构成物质系统的每一个分子的运动是无规律的这一前提，但大量分子的无规则运动的结果却导致由分子组成的热力学系统整体遵循一定的统计规律，自麦克斯韦把概率论引入由大量分子组成的热力学系统的微观过程的研究后，概率论的方法就成为进一步研究热力学系统本质特性的最有效的方法。

在概率论方法的基础上，玻耳兹曼从分子运动论角度以处于平衡态时体系是最可几分布（即玻耳兹曼分布，由玻耳兹曼分布可以自然地导出麦克斯韦分布）为基础系统阐述了热力学第二定律的微观意义，即著名的热力学熵 S 与平衡态分布，即最可几分布出现的几率 $W_{\max}$ 之间的关系：$S=k\ln W_{\max}$，而对于非平衡态，则有 $S=k\ln W^T$，W^T 为系统处于对应的非平衡态时相应的分布出现的几率。由此可见，热力学系统中的态函数熵 S 实际上是一个统计量，是一个对由大量粒子组成的体系才有意义的概念，是对多粒子体系中粒子分布的混乱程度的量度，对只含一个或两个粒子的系统根本无法谈论粒子的分布情况，更无法讨论其热力学分布的几率，对于这种情况熵的概念没有任何意义。在由大量分子构成的热力学系统中分子的运动越杂乱无序，运动的方式也就越多，态函数熵的值也越大。而热力学系统在平衡态时所包含的微观态数目最多，从而分子运动的方式也最多、最杂乱无序，熵也越大。孤立的热力学系统自发地从非平衡态向平衡态过渡中，相应的分布出现的几率由 W^T 趋向于 $W_{\max}$，而热力学系统的态函数熵则由 S 向 $S_{\max}$ 过渡，这也就意味着熵的微观本质与热力学第二定律的结论完全一致。对于由分子组成的热

力学系统而言，分子的分布从有序变为混乱可以自发发生，而相反的过程即分子的分布从无序变为有序则不可能自发地发生，这就是物质变化过程的不可逆性的微观本质。但我们知道，组成热力学系统的分子都遵循牛顿力学（更确切地说遵循量子力学的规律），从而其每一个分子的运动过程都具有可逆性，而由运动过程具有可逆性的众多分子组成的热力学系统是如何实现变化过程的不可逆性的？为了真正从分子运动论的角度解释热力学系统从非平衡态向平衡态的变化过程，即为了诠释与热力学系统的熵增大相对应的微观本质，更确切地说为了从动力学角度理解热力学系统的变化过程的不可逆性的微观本质，玻耳兹曼从分子的弹性小球模型出发，对处于非平衡态的热力学系统的分子的运动及分子之间的相互碰撞进行了详细分析。在分析过程中玻耳兹曼通过区分分子的运动及分子之间的碰撞两者分别对分子的分布函数 $f(r,v,t)$ 造成的变化，提出分布函数 f 对时间的偏导数为两种因素的叠加：

$$\frac{\partial f}{\partial t}=\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{流}}+\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{碰}}$$

并据此推导出玻耳兹曼积分方程：

$$\frac{\partial f}{\partial t}+u\frac{\partial f}{\partial r}+F\frac{\partial f}{\partial v}=\iint(f' f_1'-f f_1)u\,\sigma(\Omega)\,\mathrm{d}\Omega\mathrm{d}\,v_1$$

最终玻耳兹曼在进一步引入 H 函数（$H=\int f\ln f\mathrm{d}v$）的基础上，结合玻耳兹曼积分方程，证明了 H 函数与态函数熵 S 之间存在密切的关系：$S=-kH+$常数，并最终证明了 H 定理：$\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}\leqslant 0$，即对处于非平衡态的热力学系统而言，$H$ 函数总是随时间的增大单调减小的，这就是说从分子运动论的角度而言，热力学系统从非平衡态向平衡态的变化过程具有方向性，等式对平衡态成立。

至此，玻耳兹曼从运动过程具有可逆性的分子的弹性小球模型出发，推导出了热力学系统具有不可逆性的重要结论。但很快玻耳兹曼的结论受到了众多物理学家的质疑，其中最著名的质疑来自两个案例：①罗施密特（L. Loschmidt）提出的速度反演的方案，既然玻耳兹曼在推导 H 定理过程中假定了分子的运动过程是可逆的，那么就可以通过把系统中所有分子的运动逆转的方法验证 H 函数在分子运动过程发生逆转情况下的变化，以验证玻耳兹曼结论的正确性，即假定在 t_0 时刻 H 函数的对应的值为 H_0，经过分子的运动及碰撞，根据 H 定理，到 t_1 时刻 H 函数的对应的值降为 H_1。如果在 t 时刻将系统中的所有分子的运动速度进行反演，由于分子的运动是完全可逆的，经过同样一段时间后 H 函数的值应该由 H_1 增大至 H_0，这显然与玻耳兹曼的 H 定理相矛盾。后来的科学家对这种方案进行了计算机模拟，结果表明，在组成系统的粒子个数不很大的情况下，H 函数的变化情况的

确与玻耳兹曼的结论相矛盾，但组成系统的所有分子经过速度反演后 H 函数的值，在接近初始值 H_0 后，又会重新出现玻耳兹曼所预言的 H 函数单调下降的情况，这说明 H 函数并非如玻耳兹曼借助分子的动力学模型所证明的那样完全遵循单调下降的规律，所以 H 函数不可能是热力学系统不可逆性的标示性物理量。这一案例说明玻耳兹曼积分方程并不能够真正从动力学角度解释热力学系统变化过程的不可逆性。②策尔梅洛(E. Zermelo)提出的所谓“复现定理”对玻耳兹曼结论的质疑：对孤立的、有限的保守动力学系统在有限的时间内将恢复到尽可能接近于原始状态。策尔梅洛认为动力学系统的 H 函数不可能始终保持单调下降趋势，系统自由变化的结果将使 H 函数从其单调下降的趋势变为上升趋势，从而在有限的时间 τ 内系统的状态将无限地接近其初始状态。策尔梅洛因此认为所有热力学系统都是可逆的，从而热力学理论中有关所有热力学系统的变化过程都具有不可逆性的结论是不能成立的，也就是说所谓热力学系统变化过程的不可逆都是暂时的，其某一时刻的状态经过有限的时间 τ 迟早会再一次得到重现。但通过对各种动力学系统的 τ 值的计算发现，对于即使是只有 10 个粒子构成的动力学系统，其 τ 值大约为 10^{10} 年；而对于由数量庞大的分子(如 10^{18} 个分子)组成的热力学系统，其 τ 值的估算值之大，甚至远远超出了宇宙的年龄，对于动力学系统从某一时刻的状态恢复至其初始状态需要如此长年限的情况，即使是有限的时间，谈论其状态的恢复基本没有什么意义。其实策尔梅洛提出的所谓“复现定理”正好从一个侧面佐证了热力学系统的不可逆性。

我们知道，一般而言任何一个空间范围较小的热力学系统从熵最小的非平衡状态自发的向熵值最大的平衡态变化这一变化过程只需要很短的时间就能够完成，而系统从熵值最大的状态自发的向熵值最小的初始状态变化(可以看做是前一过程的逆过程)所需要的时间却要用比宇宙年龄长得多的时间，这本身就是一种不对称性、不可逆性的变化形式。显然，系统从熵值最小的非平衡状态自发地向熵值最大的平衡态变化这一过程，与系统从熵值最大的平衡态自发地向熵值最小的非平衡态的变化这一过程是自然界能够实现的互逆过程，由于热力学系统完成两个变化过程所需要的时间完全不同，所以这两个变化过程具有某种不对称性，从而系统从熵值最小的非平衡状态自发的向熵值最大的平衡态变化这一过程完全可以看做是不可逆的变化过程(这种不可逆形式同微观现象中 $\bar{K}^0$ 介子与 K^0 介子之间相互转变的速率不同，也可以说是与相互转变过程中所需要的时间不同从而表现出时间不对称或时间反演变换的对称破缺的情况完全类似)。

根据前面提到的物质系统的变化过程的不可逆性的定义，热力学系统从熵值最小的非平衡态自发的向熵值最大的平衡态的变化显然是必然的，而系统从熵值最大的平衡态恢复到熵最小的非平衡态的可能性非常小以致几乎不可能发生，可

见策尔梅洛提出的复现定理并不是热力学系统变化过程可逆性的有力证据;恰恰相反,该定理证明了热力学系统的变化过程是不可逆的,即能量一旦被平均分散到众多的分子上,要想使这些能量再度重新自发地聚集起来,则需要等待的时间是难以想象地漫长,从而基本上可以认为是不可能发生的变化过程。其实对于策尔梅洛提出复现定理对玻耳兹曼的结论的质疑,玻耳兹曼认为复现定理与其借助分子动力论所做出的结论并不矛盾,如对于一个孤立的与外界没有能量及物质交换的系统,通常的观点认为经过足够长的时间后该系统最终会达到平衡状态,从而其熵为最大值并且一直保持该值不变。但玻耳兹曼认为即使热力学系统处于平衡态的情况下,通过在同一时刻对系统各处局部小范围的分子分布情况的精确测量及比较,同样可以发现系统的分布对理想的麦克斯韦分布的偏离即涨落(涨落的数量级约为$\frac{1}{\sqrt{N}}$),这就是说热力学系统在达到平衡态后不可能如通常认为的那样始终保持理想的麦克斯韦分布,因此其 H 函数并不为常数,而是随着时间的增大不断出现小的涨落,这种涨落与系统从初始的非平衡态向平衡态变化时 H 函数的量值的变化幅度相比要小得多,并且如果令组成热力学系统的分子数目 N 及系统所占据的空间的体积 V 均趋于无穷大,即令 $N\to\infty$ 及 $V\to\infty$,这时$\frac{N}{V}\to K$,这样即可将涨落全部抹平,由于系统不再是有限的,系统从平衡态向初始的非平衡态的复现时间将为无穷大,从而复现定理不可能再适用。

我们知道,平衡态是热力学理论中一个非常重要的概念,当热力学系统处于平衡态时,系统具有最简单的性质,在这种情况下只需使用几个简单的参数就可以对系统进行完备的描述,而且就连热力学理论中最重要的概念——熵也是在热力学系统处于平衡态的情况下才有完全确定的意义。热力学系统中的平衡态其实都是从非平衡态转变而来,是非平衡态变化的结果,而由于热力学系统从非平衡态向平衡态转变过程具有不可逆性,从而要描述系统从非平衡态向平衡态的转变过程是非常困难的。在经典的热力学中,为简化研究对象极其繁杂的数学处理过程,科学家往往回避对热力学系统从非平衡态向平衡态转变过程本身的描述而转向直接对最终的结果——平衡态的描述,如在对卡诺机对外做功的情况进行研究中就把相应的变化过程进行了理想化处理,在思想实验中让卡诺机的工作过程进行得无限缓慢(这在现实中是不可能完成的),从而在每一个瞬间系统与外界之间都会处于热平衡状态,在该种情况下系统的热力学性质不会发生任何变化,而且系统的熵在任一时刻都相同并且保持其最大值,在此情况下由于系统在变化过程中没有热量损失,从而系统的任意时刻的变化可以看做是完全可逆的。我们从卡诺对卡诺机的研究结果可见,即使是对这种理想的热机而言,热也不可能全部转化为功,从而

热力学第二定律不可能被打破。我们知道，任何一个孤立的热力学系统在初始状态时其熵为最小值，与之相对应的系统具有最大的对外做功的能力；而随着时间的流逝，系统的熵值不断增加，从而对外做功的能力逐渐减小，当系统的熵达到最大值时，已经没有进一步对外做功的能力。为了描述热力学系统所具有的这种对外做功的能力，美国物理学家吉布斯(Josias Willard Gibbs)在平衡态热力学理论中引入一个非常重要的概念——自由能——来表征热力学系统的这种能力，由于热力学系统处于平衡态时的熵值具有最大值，意味系统没有对外做功的能力或者说对外做功的能力为最小值，从而在平衡态时热力学系统具有最小的自由能。我们知道，用于表征物体所具备的对其他物体做功能力的所谓能量(如动能、势能等)概念可以对描述物体的动力学过程带来极大的便利，而在热力学理论中把自由能这一物理量赋予热力学系统就如在动力学理论中把能量的概念赋予物体一样可以起到同样的作用。由于在平衡态时，热力学系统的熵值具有最大值而其自由能则具有最小值，这样表面上看熵与自由能这两个概念似乎具有等效性，实际上这是两个有密切关系而又完全不同的概念，自由能是表征系统所具有的对外做功能力的物理量，而熵则是表征构成系统的最小能量单元在空间中分布情况的物理量；自由能的概念及方法衍生出的吸引子的概念则可以推广至非平衡态的热力学系统的描述中，而物理学家至今还没有找到有效的方法将熵这一概念推广至系统处于非平衡态时的情况。把自由能这一物理量赋予热力学系统后，在对该系统的热力学势的描述过程中就可以把系统当做一个放置在高山上的小球看待，当小球滚落到山谷中时，小球的势能具有极小值，相应的热力学系统的自由能具有极小值；而当小球处于山峰上时，小球的势能具有极大值，相应的热力学系统的自由能具有极大值。我们知道，对于小球而言，无论其初始位置如何，只要其势能不为零，最终停止滚落的地点都是不变的，热力学系统的情况与此完全类似，这样一个点通常被称做热力学系统随时间演化的平衡吸引子，平衡吸引子的概念可以形象地描述热力学系统处于平衡态时的情况。比如对于一个化学反应而言，如果把该化学反应看做一个放置在高山上的小球，那么无论如何该小球最终都会滚落在山谷里并停止运动，类似的该化学反应的变化过程最终都会在某一时刻全部完成而达到其唯一的平衡态，这一平衡态即可看做是该化学反应的平衡吸引子，而且该化学反应的终态与其初始条件无关。当然热力学系统的吸引子并非都是唯一的，如对某些热力学系统而言，吸引子其永恒的归宿点，就如地球对其引力范围中的物体的万有引力使得物体永远无法从地球上逃逸出去一样，无论其变化过程的起始状态如何，一旦系统到达这一点就会永远停留在这一点上，而不会再度离开这一点，并从此失去任何生机(这也就意味着平衡态对任何热力学系统而言都是一种死寂的状态)，这种吸引子是静态的、唯一的，如平衡态的热力学系统的吸引子就是如此；而对另一些热力学

系统而言，吸引子又如系统在变化过程中不断停下来进行短暂休整的驿站，系统会不断光顾又不断离开这些点，而不会在这些点上停顿，从而使系统永远充满活力，这些吸引子完全是动态而非静态的、唯一的，如非平衡态热力学系统特别是远离平衡态的热力学系统甚至具有更为复杂的吸引子，这些系统的吸引子往往已经不是静态的而是动态的，而且其形态更为复杂，如有些吸引子为动态的圆环、甚至可以是高维度的动环面，而系统可以在这些复杂的吸引子上演化。经典的热力学理论基本上都是关于平衡态或接近平衡态的热力学系统的理论，但现实中涉及的许多热力学系统则是非平衡态的甚至是远离平衡态的系统。通常情况下描述非平衡态的热力学系统，特别是远离平衡态的热力学系统的数学方程非常复杂，但对一些简单的非平衡态系统理论上仍然可以用线性方程进行近似的描述，而对于众多的远离平衡态的系统，则需要用非线性方程进行描述，而且所需建立的物理方程极其复杂（如对于活的生物体而言，由于生物体中每时每刻都有几十种化学反应在进行着，从而与这些化学反应方程式相对应的数学方程的变量同样要有几十个，方程的个数也需要几乎相同的个数，而且由于生物体中进行的化学反应既有正反馈形式的，也有负反馈形式的，从而相应的数学方程应该是非线性的，方程的形式肯定是极其复杂的）。虽然如此，但并不意味着我们无法对这样的系统的变化规律进行任何思考，由于通常情况下这种系统都不可能是孤立的而是完全开放的系统，因此，系统与周围环境之间必然存在物质及能量的交换，而正是在这种物质及能量的交换过程中，系统维持着自身复杂的结构及存在模式，从而确保自身的熵值不会随着时间而增大，与此同时，系统的周围环境的熵则会不断增大，从而造成环境更大程度地不可逆变化。所有这一切都说明，不论多么复杂的热力学系统其变化过程本身都具有不可逆性。

1.6.3 生命现象的变化过程的不可逆性

生命现象是宇宙中结构及形态最复杂、最瑰丽多彩、最具多样性的特殊的物质变化过程。而对于生命的本质是什么的问题，科学家至今无法给出一个严格的、科学的定义。但科学家借助显微技术对各种生命现象细致地观察发现，除病毒之外，包括人类在内的所有其他生命现象都是由细胞这一最小结构单元构成的，在任意时刻所有与生命活动有关的最重要的物质变化过程都涉及一系列（种类达几十种甚至上百种的）化学反应及物理变化，而所有这些化学反应及物理变化都是在细胞这一自组织的环境中实现的。其中氨基酸、糖类及脂类等是细胞中最常见的物质，是生命活动的物质基础；蛋白质则是生命现象的结构及信号传导、催化反应等的物质基础；而存在于细胞核内的核糖核酸（即 RNA）及脱氧核糖核酸（即 DNA）则是生命现象中最重要的物质（通常被称做遗传物质）。一方面正是依靠遗传物质使得

各种生命现象的结构形态得以一代一代地传承下去并保持基本不变，从而遗传物质是生命不断得以延续的物质基础；另一方面由于在遗传物质中存在着掌控生物体内各种重要物质如蛋白质生成的开关，从而决定了我们身体的各种特征，如头发及皮肤的颜色、面部形态、血型、个子高矮等，甚至决定着对某些疾病的敏感程度，特别是最近生物学家的研究发现，遗传物质 DNA 还能够控制人的寿命，因此科学家能够根据每个人的 DNA 特定的基因片段非常精确地预测这个人自然死亡的具体时间（是在上午或下午的几点钟），可以形象地说遗传物质就是生命现象的控制器，所有生命现象正是在遗传物质中已经编制好的程序控制下按部就班地有序进行着。因此，遗传物质对生物体个体的生老病死都具有异常重要的意义，可以说没有遗传物质，就不可能有生命现象。只要生命现象没有终结，那么构成生物体的细胞单元中每时每刻都会发生与这些物质有关的众多复杂的化学反应，一旦这些化学反应停止了，生命现象也就终结了。不太严格地说，生命现象的本质就是每一个生物个体体内所进行的所有有序的、自组织的化学反应的总和，而生命现象就是这些有序的、自组织的化学反应的表现形式。对于生命现象中的自组织过程，比利时物理化学家伊·普里戈金在其著作中进行了生动的描述："我们看到一个逐渐组织起来的生物空间，每个事件都在某个瞬间和某个区域进行，从而使过程的整体协调成为可能。这种生物空间是具有机能的空间，而不是一个几何空间。标准的几何空间，即欧几里得空间，对于平移或旋转是不变的。生物空间就不是这样。在生物空间里，事件是局域于空间和时间的过程，而不仅仅局域于轨道①。"正因为生命现象是自组织的化学及物理变化的总和，因此生命现象的本质就是"有活力的"、不断与外界进行的能量及信息交换的物质变化过程，其中 DNA 及 RNA 就是这些化学反应的协调、组织者，生命空间中所有发生在特定的时间、空间中的事件都由这两种物质决定。而有些蛋白质则是这些化学反应的催化剂，正是这些催化剂使得相应的各种化学反应能够在比较低的温度条件下稳定、高效、有序地进行着。

生命现象最重要的特征是新陈代谢、生长发育、繁殖、感应（即对外界环境的感觉及反应或反映）、适应等。所谓新陈代谢就是生物体维持生命所需的各种化学反应的总称，是生物体不断与环境进行物质和能量交换的过程，当然，这种过程非常脆弱，很容易被环境的变化所打断，从而导致其与环境之间的物质、能量的交换中断，而一旦与环境之间的物质和能量的交换停止了，生物体的生命现象就会结束。生命的代谢可分为分解代谢与合成代谢两种方式，分解代谢（如细胞呼吸）可以对大分子如淀粉、糖类、蛋白质等进行分解，以获得生物体维持生命现象所需要的能

① [比]伊·普里戈金．从存在到演化——自然科学中的时间及复杂性[M]．曾庆宏，严士健，马本堃，沈小峰，译．上海：上海科学技术出版社，1986：4．

量;合成代谢则可以利用能量及细胞中已经存在的小分子化学物质合成细胞中维持进一步的化学反应所需要的各种重要的化学物质如蛋白质和核酸等,以维持生物体进一步生长、发育的需求。如动物的新陈代谢是动物从环境中获取食物经过消化系统的消化后,其中有用的成分被机体吸收而其他难以被消化的成分则被当做废物排泄出去,其中被机体吸收的成分如蛋白质、糖类、脂肪等被进一步分解成可以被生物体利用的小分子,分解过程中产生的热量则为进一步的化学反应提供足够的能量并使生物体内保持合适的温度环境,而小分子则又成为合成机体所需要的蛋白质等物质的不可或缺的材料。所谓生物体的生长发育是指随着时间的不断增加,生物体不断地长大、成熟并具有更强的适应能力的变化过程。繁殖则是生物体为延续种群的独有特征,生产与自身的所有生命特征完全相同的后代的现象。感应则是生物体为适应不断变化的生存环境而对环境进行感知并通过神经中枢对感知进行信息处理,最终形成对周围环境的概括性的反映过程,感应可以帮助生物体作出有利于生物体生存的反应,也就是所谓的趋利避害的反应。

形形色色的生命现象虽然具有复杂多样性,但都具有一个最重要的特性,那就是所有生物体存在时间都是有限的,从简单的单细胞生物如细菌到复杂的多细胞生物如人类,每一种生物个体都会经历生、老、病、死这样一个必然的变化过程,而且这一过程也是完全不可逆的。如我们亲眼所见的自己的祖父母或自己的父母伴随着我们的出生及成长随时间的流逝在逐渐衰老,最终去世并永远地离开我们;实际上不单是我们的父母而且包括我们自己在内的任何人从出生开始必然要经历婴儿、童年、少年、青年、中年、老年最终到死亡这几个阶段,并且这整个变化过程是单方向的、不可逆的,从古至今还从未发现此相反的过程发生;又如考古学发现许多与现存的生物物种完全不同的物种的化石(如恐龙化石),考古学家通过对这些物种的化石年代的确认还原这些生物物种生活的年代及其生活的环境,从而可以确定这些物种曾经在地球上存在过,但后来或由于自然死亡、或由于被捕食者猎杀、或由于自然灾害等原因永远地消失而且再也没有出现过,这些考古学的研究结果同样是生命现象不可逆性的有力证据。

以上关于生命现象的不可逆性的结论只是从我们观察及经验常识的角度得出的,其实对生命现象及其不可逆性本质的探索同样是现代科学最重要的内容之一。我们知道任何与周围环境没有能量及物质交换的空间范围有限的孤立系统(包括复杂的生命系统),即使其初始状态处于远离平衡态,最终都会趋于平衡态,系统的熵最终都会趋于最大值,在这种状态下系统各处的熵只可能具有微小的涨落,从而系统任何空间位置及其附近微小范围内的结构都只能是某一确定空间位置及其附近微小范围内结构的简单重复,也就是说处于平衡态的热力学系统只能具有简单的空间及时间结构,从而不可能产生出复杂有序的耗散结构。而活的生命系统则

不断与环境进行着物质及能量的交换，通过这种方式维持着极其复杂的空间及时间结构(特别的生命系统为适应复杂多变的环境还可以通过进化产生出更加能够适应环境的空间及时间结构)，这也就是说生命系统必定是远离平衡态的复杂系统。对于生命现象的这一特征，薛定谔在其世界名著《什么是生命》中有过经典的论述："一个生命有机体具有推迟趋向热力学平衡(死亡)的奇妙的能力，……'生命以负熵为主'，就像是活有机体吸引一串负熵去抵消它在生活中产生的熵的增量，从而使它自身维持在一个稳定而又低熵的水平上。……一个有机体使它自身稳定在一个高度有序水平上(等于相当低的熵的水平上)所用的办法，确实是在于从周围环境中不断地汲取序[①]。"也就是说生命个体正是通过向环境汲取负熵的方式导致周围环境熵的增大，从而最终造成环境的不可逆的变化。首先，生命现象是有序的、自组织的化学反应及物理变化的总和。如生物体内的所有细胞中每时每刻都在发生着分解代谢的化学反应，不断地分解蛋白质、脂肪、糖类等物质，从而释放出热量，为细胞内持续的化学反应提供足够的能量；另外，生物体内的所有细胞中每时每刻又都在发生着合成代谢的化学反应，这些反应不断把一些较小的分子合成较大的分子，如把氨基酸合成蛋白质等，以提供产生新的细胞所需要的足够的物质材料等，确保生物个体能够不断成长、壮大。

而由上面的讨论我们知道，所有的化学反应都是不可逆的，从而在这个意义上可以说生命现象是不可逆的。其次，每一个生物体内每一时刻所进行的化学反应与紧接着的下一时刻的化学反应虽然是相似的，但随着生物个体的不断成长，细胞内有害物质的不断积累以及死亡的细胞数量的不断增加，生物体内细胞的代谢能力逐渐减弱，最终导致生物个体产生疾病及衰老，而且这一过程同样是不可逆转的。我们知道生命现象是有序的、自组织的化学反应，是一些特殊的、相互交织的、能够不断循环的化学反应链条，链条中任何一个环节的断裂都意味生命现象的终结，因此这些化学反应同样必须遵循化学反应的所有规律，而任何化学的变化过程及化学反应都会从周围环境中吸收热量或向周围环境释放热量，即都会与周围环境进行能量的交换，从而根据热力学第二定律可以得出任何化学变化过程都具有不可逆性的结论，在此意义上生命现象同样具有不可逆性。再者，由于化学反应的生成物不会继续直接与反应物发生化学反应，从而生成物生成的过程就是相应的化学反应终止的过程，也即从反应物到生成物这一过程是不可逆的过程，从而在这个意义上生命现象同样是不可逆的。由于生命现象的存在靠持续的、不断循环的化学反应链维持着，因此这种化学反应链不可能是几个简单的化学反应就能实现的，而是必须有一系列复杂的、能够不断为后续的化学反应提供持续反应所需要的

---

① [奥]埃尔温·薛定谔.生命是什么[M].罗来鸥，罗辽复，译.长沙：湖南科学技术出版社，2007：72.

反应物及维持反应所需要的能量的化学反应的参与及环境条件得支持，而随着时间的不断推移，必定会产生许多影响化学反应链持续进行的有害的化学物质，这些化学物质必然会对化学反应链的效率产生影响，随着这种影响的不断积累，整个生命系统的活力会逐渐减弱，以至于导致生命的衰老、死亡，这一过程显然也是不可逆的。综合上述所有讨论，我们可以得出具有普遍意义的结论：生命现象的变化过程本身具有不可逆性。

1.6.4 宇宙及恒星变化过程的不可逆性

在爱因斯坦的广义相对论及量子力学建立之前，科学家及哲学家们普遍认为，无论从时间上还是从空间范围来看，宇宙是无限的，因此宇宙无所谓产生及消亡，从而科学无法将整个宇宙作为一个整体建立模型并对宇宙的历史进行详细的研究，这种情况下宇宙作为一个整体仅仅只是哲学研究的对象，由此得出的结论也是笼统的、模糊的，其价值也是极其有限的。这一情况自广义相对论及量子力学建立后完全得到了改观，而正是广义相对论及量子力学的出现使得宇宙能够作为一个整体成为科学的对象。通过对宇宙的科学研究，科学家们已经对宇宙（包括宇宙中的星系及恒星甚至我们人类在内的）万物的产生、演化及最终结局有了较为详细的了解，这些得到天文观测数据支持的关于整个宇宙的科学知识目前已经逐渐成为人类的常识并被广泛接受。

我们知道，将描述“时空”的均匀性及各向同性的度规代入广义相对论中的爱因斯坦场方程，就可以得到描述我们所能够观察到的宇宙运动的基本方程，该方程也常被称做弗里德曼方程，现代科学对宇宙的起源及演化的研究就是从对弗里德曼宇宙学方程的研究开始的。现代宇宙学通过对弗里德曼宇宙学方程求解发现，宇宙是不稳定的并且始终处于不断膨胀地过程中，如果将时间倒推回去，那么宇宙过去的尺度显然应该比现在的小，而如果假定宇宙的膨胀是从一个初始的空间点（由于空间点没有体积、大小为零，因此常被称做虚无）开始的，并且假定宇宙在这一点上起源的那一时刻温度无限得高、密度无限得大，那么就可以对宇宙的产生及演化构造出一个完整的假说，实际上通过将哈勃对大尺度宇宙空间星体运动规律的精确观测得到的哈勃常数带入弗里德曼宇宙方程，就可以得出宇宙是距今大约138亿年前在一次自虚无中产生的并且将一直膨胀下去的结论，这就是1950年左右由伽莫夫首次建立的宇宙的热大爆炸学说，其实宇宙的大爆炸学说就是关于宇宙中的所有物质是如何产生及演化的宇宙的历史。显然，在宇宙起源的那一时刻，广义相对论已经失去作用，也即我们已经不能用广义相对论去描述宇宙刚刚产生的那一时刻的“时空”结构，而必须考虑物质的量子特性。宇宙大爆炸学说得到了美国天文学家埃德温·哈勃关于星系光线普适的红移现象、美国贝尔电话公司的

工程师彭齐亚斯和威尔逊所观察到的来自宇宙深处的、各向同性的宇宙的3K微波背景辐射现象以及宇宙的氦(^4He)元素丰度(即占总物质的比例)与大爆炸理论计算值之间惊人的吻合等观测数据的支持。

虽然宇宙大爆炸学说认为包括所有星系及星体在内的整个宇宙是在大约138亿年前由空间中的一点上产生的,但是宇宙中的所有星体及构成星体的物质显然不可能在宇宙从空间中的某一点上产生出来的那一时刻就一起产生了,因为宇宙中的星体及构成星体的物质单元(如质子、中子、原子及分子等)都占据着有限大小的空间范围,特别是当前宇宙中存在的各种星体往往都占据着巨大的空间范围,绝对不可能是空间中的一个点所能够容纳得了的,也就是说当今宇宙存在中的万物在宇宙刚刚由大爆炸产生出来的那一瞬间是不可能存在的,从而宇宙早期的情况必定与现在完全不同,因而当今宇宙中的所有物质(包括我们的太阳系在内的所有星体)必定是由宇宙中的原始物质逐渐演化而来。宇宙大爆炸学说认为,整个宇宙是从一个奇点产生的,在大爆炸刚开始的那一时刻,由于宇宙的体积无限得小,因此物质密度及环境温度都无限提高以至于无法用有限的数量加以描述,而由于宇宙大爆炸学说是以广义相对论为基础的,因此在宇宙大爆炸刚开始的那一时刻广义相对论失去了作用,从而宇宙大爆炸学说在这一时刻成为无法描述的对象而成为没有意义。但考虑到在宇宙大爆炸刚开始时的体积属于微观范围,因此量子效应成为必须考虑的因素,也就是说在大爆炸刚开始的时刻,必须考虑引力的量子化特征,特别是宇宙的能量应该以普朗克能量为起点,由此估算出宇宙的起点能量应该是10^{19}GeV,由量子力学中的海森堡不确定性原理,可以估算出与之相对应的时刻约为10^{-43}s,也就是说宇宙大爆炸的起点时刻不是0s而是10^{-43}s。从宇宙大爆炸开始的10^{-43}s到10^{-4}s这一时间里,宇宙的温度从大约1×10^{32}K下降至1×10^{12}K,宇宙的空间范围得到了急速膨胀,从而构成宇宙的物质密度也大幅度下降,特别是为了理解宇宙中物质分布的均匀性,有理论甚至提出在宇宙大爆炸刚开始后一个很小的时间段中宇宙空间发生了所谓的暴涨,宇宙空间的暴涨持续的时间虽然非常短暂,但对宇宙空间中物质的分布却异常重要。由于在宇宙大爆炸开始的那一时刻温度极其高,这种情况下宇宙中的物质不可能以任何形式存在,如量子力学的计算及相应实验的测量结果告诉我们,一般情况下,分子的电离能远小于1eV,而氢原子的电离能(即使基态的气态原子失去1个电子形成+1价气态正离子所需要的最低能量)等于13.60eV,也就是说当环境温度高于105K,从而热力学系统中粒子的平动动能超过10eV时,就连分子间的碰撞也能使得分子及原子产生解离,因此在大爆炸刚开始的极其短暂的时间段内分子、原子等粒子是绝对不可能存在的,宇宙大爆炸学说的理论计算以及高能物理的相关实验都证明,在这种环境条件下包括电子、质子及中子等粒子甚至构成质子及中子的夸克等在内的基本

粒子都是绝对不可能存在的，而随着宇宙温度的下降，包括夸克、轻子(光子、电子、中微子等粒子)、规范粒子以及这些粒子的反粒子等才逐渐形成，而由于这种条件下物质密度极高，从而使得电子、中微子、质子及中子等粒子与它们的反粒子之间很难相遇并因此产生湮灭。随着时间的流逝，宇宙的体积开始迅速膨胀，从而宇宙辐射的温度以及物质密度也开始下降，在宇宙大爆炸发生约 10^{-4}s 秒钟那一时刻，宇宙的温度下降至 1×10^{12}K，而宇宙的物质密度则下降到 10^{15}kg/m^3，在这一时间里夸克之间按一定方式结合为质子及中子。根据弗里德曼宇宙方程及统计物理学等公式，就可以按大概的比例推算出1秒钟以后其他时刻宇宙中辐射的温度及物质密度。这样随着时间的进一步流逝，宇宙的体积持续增大，温度则继续下降，宇宙的物质密度也进一步下降，而在宇宙大爆炸后1秒的时刻，宇宙中物质系统的温度下降至大约 1×10^{10}K，在这一温度条件下，由于宇宙中的物质密度进一步下降以至于中微子可以向外逃逸，而且正负电子可以在空间中运动并相遇而产生湮灭变成光子，而只有极少数的电子被保留下来，但由于宇宙物质的密度之高以至于使得光子也无法辐射出去，而质子及中子在产生之初与反质子及反中子相遇的几率非常大，因此很快就会与这些反粒子相遇而发生湮灭，即粒子与其反粒子之间处于"产生→湮灭→产生→湮灭"的循环往复过程中，从而使所有这些粒子存在的时间都是极其短暂的。而由于温度太高，从而质子及中子的动能太大以至于强相互作用尚不足以将它们结合为氘原子核。而在宇宙大爆炸后大约100s的时间里，宇宙的环境温度下降至大约 1×10^{10}K，在这个温度条件下，当1个质子与1个中子之间相距足够近以至于处于强相互作用范围之内的情况下，就恰好能够通过强相互作用相互结合形成氘原子核，而由于环境温度还是过高使得氘原子核不可能与电子结合形成氘原子，两个氘原子核可以进一步结合成为氦原子核，这种原子核包含2个质子与2个中子，另外更多的氘原子核还可以结合形成少量质量更大的原子核如锂原子核及铍原子核。

需要特别说明的是宇宙大爆炸学说通过计算发现，在所有由夸克所形成的质子与中子中大约有25%的质子与中子通过强相互作用结合为氘原子核，这些氘原子核又可以进一步结合为氦(^{4}He)原子核，这就是宇宙大爆炸学说中重要的预言之一——氦丰度预言，而氦丰度问题是任何其他宇宙演化学说都无法解释的，随后的宇宙学的观测数据与氦丰度预言非常吻合，从而为宇宙大爆炸学说提供了有力的证据。在宇宙大爆炸产生后的几分钟到几个小时里，由于温度以及物质密度等环境条件的变化，宇宙中包括氘、氦以及少量的锂、铍及硼等元素的原子核的产生将会停止，至此，构成所有恒星并为其提供足够维持上百亿年的核聚变反应的原始材料的最主要的元素——氘元素与氦元素——已经全部产生出来。而在此后的很长一段时间里，除了体积的不断膨胀、环境温度及物质密度的继续不断下降之外，

宇宙中没有再发生其他重要事件，以上是宇宙大爆炸学说关于宇宙大爆炸发生后最重要阶段的简单描述。不过，从以上关于宇宙大爆炸的描述可见，在叙述过程中完全没有对构成整个宇宙物质的最主要组成部分的暗物质(起着将宇宙中的各种物质聚集起来的作用)以及暗能量(使得宇宙空间加速膨胀、宇宙中所有物质相互之间加速远离)是如何产生的及其在宇宙大爆炸发生过程中所起的作用有所说明。实际上，从空间中的一点发生的宇宙大爆炸本身完全可以理解为从空间中的一点上发生的宇宙空间的急速膨胀，即发生在138亿年前的宇宙大爆炸就是一直持续到现在，而且还将一直持续下去的宇宙加速膨胀的开端，从而宇宙空间加速膨胀的原因应该与宇宙大爆炸产生的原因完全相同。而现代天文学的各种观测表明，宇宙的加速膨胀正是由暗能量的存在而导致的，这也就意味着暗能量也许在宇宙大爆炸发生过程中同样起着至关重要的作用，也许正是由于暗能量的存在使得整个宇宙从空间中的一点开始膨胀，所以暗能量可能并不是宇宙大爆炸的产物，而是导致宇宙大爆炸发生的主要原因之一。但当今科学界对暗物质及暗能量到底是什么、具有什么结构及性质以及这些物质与普通物质之间的区别与联系等并没有获得哪怕一丁点线索。这也是宇宙大爆炸学说本身存在的缺陷，有待于今后天文学方面对宇宙的持续观测中不断完善对暗物质以及暗能量的认识，并在此基础上完善、充实宇宙大爆炸学说。

在广义相对论建立起来后不久，爱因斯坦通过对由引力场方程建立的宇宙模型的研究发现，由宇宙模型求解出的宇宙只能或者处于膨胀状态或者处于收缩状态而完全不可能处于静止状态，爱因斯坦为了使所得到的宇宙解与人们直觉上而不是科学观测上所形成的静态宇宙的观念相协调，在宇宙模型的方程中引入了他后来认为是一生最大错误的宇宙常数。但后来的天文观测发现宇宙并不是静止不动的，而是处于不断膨胀的过程中，而这正是爱因斯坦的宇宙模型特别是弗里德曼的宇宙模型所能够预言的一种现象，广义相对论也因此成为研究宇宙的演化过程的最有力的工具。在138亿年前发生的宇宙大爆炸所造成的宇宙空间的不断膨胀，是我们今天借助天文望远镜仍然能够观察到的现象，宇宙的这种产生方式可以借助弗里德曼宇宙方程进行精确的描述，但我们不禁要问宇宙会一直膨胀下去、或是在经过相当长时间的膨胀后，会重新收缩最终聚集到一点上成为一个黑洞吗？这些问题能够通过对弗里德曼的宇宙模型的研究得出结论吗？其实弗里德曼的宇宙模型确实能够提供可能的解答，而其中的关键仍然是爱因斯坦认为将其引入宇宙方程是其一生中最大错误的宇宙常数，宇宙学家通过对含有宇宙常数的弗里德曼宇宙模型的研究以及对相关参数的观测，得出宇宙常数是正确的这一结论，并由此断言宇宙正在加速膨胀而且将永远膨胀下去，而当代天文学的观测也表明宇宙正在加速膨胀，从而证明了宇宙模型的正确性。由此我们可以断言：宇宙自从奇点

产生出来演变至今天的状态甚至直到久远的未来，其变化过程都将是单向的、不可逆的，即宇宙永远不可能再重新返回到其最初大爆炸产生之前的状态。物理学家们甚至将宇宙从空间中的一个奇点上通过宇宙大爆炸产生出来之后又因为不断加速膨胀而最终导致宇宙将无限制地膨胀下去直至宇宙空间无限得大、宇宙中的物质密度无限得小、宇宙空间的每一个角落的温度都将无限地接近绝对零度、宇宙中任何复杂的物质结构最终都将不复存在，从而宇宙的熵最终达到最大值的状态这一变化方向称做时间的宇宙箭头。由上面我们已经详细讨论过的时间反演变换的意义我们知道，这里同样不存在任何所谓的时间箭头，而是指宇宙本身变化过程的方向，即宇宙的变化过程本身的方向是单向的、不可逆的。同样的，自大爆炸刚产生时，宇宙中没有任何物质形态开始随着宇宙空间的不断膨胀、宇宙中介质温度的不断下降、物质密度的不断降低最终导致各种复杂物质结构的出现直至生命现象的出现，这一变化过程同样是单向的、不可逆的过程。而大爆炸后自宇宙中产生的质子、中子、电子等粒子与其反粒子相互湮灭，宇宙中只剩下少量的物质粒子后，整个宇宙的熵就开始逐渐增大并且一直处于不断增大的过程中，这个宇宙中熵不断增大的变化过程本身就是一个单向的、不可逆的过程。

大约距宇宙大爆炸后 100 万年的时间，宇宙的环境温度下降至几千度，这种情况下宇宙中存在的自由电子与原子核之间通过电磁相互作用结合为中性原子，这些中性原子主要是氘原子及氦原子（还包含少量的锂及铍等原子），随着宇宙环境温度的持续下降，其中的氘原子及氦原子逐渐结合为氘分子及氦分子。另外，原先与原子核及自由电子之间存在相互作用的光子失去了作用对象从而成为自由光子，这些光子随着宇宙的不断膨胀向宇宙空间的各个方向辐射出去，这就是今天我们借助仪器仍然能够观测到的宇宙微波背景辐射，宇宙微波背景辐射的存在也对宇宙大爆炸学说提供了有力证据。由于在膨胀过程中，宇宙空间各处的物质密度会产生微小的涨落，有理论认为这种微小的密度涨落是由暗物质造成的，正是由于暗物质的存在，这种密度涨落会随着时间的推移被逐渐放大，最终将在宇宙空间中的某些区域聚集成大量的主要由氘分子及氦分子（还包含少量的锂及铍等原子）构成的原始气体云，这些原始气体云的密度为每立方厘米数百万个分子及原子，所占空间直径往往达到几十甚至几百光年的范围，总质量相当于几十万甚至上千万个太阳质量。构成这些原始气体云的氘及氦等分子在万有引力等各种复杂因素的作用下逐渐汇聚成较大的物质团块，这一较大的物质团块又进一步将其周围更大范围内的气体分子吸引到团快上并且像滚雪球一样越来越大（科学界推测，在此过程中暗物质起着至关重要的作用，科学家认为正是由于广泛分布在宇宙中的暗物质的引力作用将普通物质聚集在一起），在物质团块不断增大的同时，在万有引力的作用下物质团块的中心不断地收缩，而物质团块周围的分子气体云也开始以这一

物质团块为中心作旋转运动，当中心物质团块的规模达到足够大时，团块内部由于原子之间越来越剧烈的碰撞形成高温及高压环境，当团块中心及附近的温度及压力达到氘的核聚变反应条件时，等离子态的氘元素开始发生核聚变反应而生成氦原子核，同时释放出能量，即$^{2}_{1}H+^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He+\gamma$，这样物质团块开始对外产生出巨大的能量，最终使得该物质团块停止引力收缩而达到平衡状态，进入一个相对稳定的阶段，这些能量中的一部分由光子携带并辐射出物质团块从而使物质团块发光发热，当然伴随着向外辐射的光同时也有大量的等离子气体向外逃逸，这种发光的物质团块就是我们通常所说的恒星，太阳就是其中之一；在宇宙空间不同区域中的恒星在万有引力的相互作用下，聚集在一定空间范围内构成星团，一些相距较近的星团在万有引力的相互作用下又形成星系，一些相距较近的星系在万有引力的作用下又构成更大的空间结构，即星系团，每个星系都是由上千亿颗恒星构成。由于恒星的质量有大有小，小的可能只有太阳质量的一半，而大的则可以达到几百倍甚至上千倍太阳质量，如不久前天文学家就发现了质量达到三百个太阳质量的恒星。由于质量越大的恒星其内部引力强度越大，从而温度越高，辐射出的光子能量也越大，其内部中心核聚变反应进行的速度也越快，其光球表面的颜色偏向蓝色。恒星内部发生的核聚变反应为恒星维持其内部的高温及高压环境提供了所需要的源源不断的巨额能量，而恒星内部的高温及高压环境为后续进一步的核聚变反应提供了充分的条件。经过核聚变反应，恒星内部的氘元素不断聚合生成氦元素，并释放出大量能量，这些能量最终主要以光的形式向宇宙空间辐射出去。经过几百万甚至几十亿年的时间，当恒星中心附近大部分氘元素被消耗并生成氦元素时，由于要使氦元素发生核聚变反应，恒星中心附近必须具有更高的温度及压力，因此核聚变反应暂时停止，这时由于恒星内部失去了维持其内部高温及高压环境的核聚变反应，恒星内部的温度及压力逐渐下降，恒星的核心由于失去压力在万有引力的作用下向内压缩，而恒星的外壳则在反作用力作用下向外膨胀。当恒星的质量大于太阳质量的 0.5 倍时，随着恒星内部压力的增大，温度也急剧升高，当温度达到氦的核聚变的临界条件时，恒星内部的核聚变反应再次启动，将产生氦聚变成碳的核反应，即$^{2}_{3}He+^{3}_{2}He \rightarrow ^{6}_{4}C+\gamma$，聚变会重新产生能量，使恒星内部的温度及压力重新上升，最终使得恒星内部达到新的平衡，恒星又能够继续发光发热，对于与太阳质量相当的恒星，这一过程大约可以持续十亿年之久。对于质量小于太阳质量的 0.5 倍的恒星，则由于其中心附近在氘元素消耗殆尽核聚变反应停止后，恒星的质量不足以使恒星在其万有引力作用下进一步收缩从而最终达到氦元素发生核聚变反应的条件，其核心附近在氘元素耗尽之后，不会发生氦元素的核聚变反应。在其核心的核聚变反应停止后会变成红矮星，红矮星会向外不断地辐射红外线及微波波段的电磁辐射，最终红矮星会随着能量的不断损失而变暗变冷，红矮星可以以这种状

态存在达上千亿年的时间。对于超过5倍太阳质量的恒星,其核心在每一级核聚变反应停止后,由于在巨大的万有引力的作用下,可以被重新挤压,导致环境的温度和压力的再次上升,从而继续触发新的核聚变反应,当然所有这些聚变反应在生成新的原子量更重的元素之外,同时还伴随着能量的产生,而产生的能量进一步导致恒星内部的温度及压力的上升,并进而使恒星内部的作用力达到新的平衡。这些核聚变反应会生成原子量越来越重的元素,直至硅元素的聚变反应生成铁元素,而铁元素则不但不能够通过聚变反应释放能量,相反,要实现铁元素的聚变反应需要从外界吸收能量,因此,当恒星的核心区域的多数物质通过聚变反应生成铁元素时,接下去的核聚变反应将无法进行,这样由于恒星内部没有能量的进一步补充从而导致其内部的压力不足以抵抗万有引力的作用,从而导致其核心产生坍缩,紧接着在非常短暂的时间内导致剧烈的超新星爆发。一方面其核心进一步坍缩,当恒星的质量足够大时,其核心将最终坍缩形成黑洞;另一方面,恒星的外壳中比铁元素的原子量小的元素以及中微子在被抛出的过程中形成冲击波,这些冲击波可以为被抛出的元素提供局部的核聚变条件,从而形成一些比铁元素重的放射性元素,其中最重的是铀元素。超新星爆发抛射至太空中的物质与宇宙中到处存在的氢气及氦气共同组成星云物质,这些含有原子量比氢元素及氦元素大的各种元素的星云为第二代星系的形成提供了必要的物质条件(而且这些元素同样是包括像我们人类在内的复杂生命结构的物质基础),在万有引力的作用下,这些星云将最终形成像太阳系这样含有像地球等类地行星的星系。可以说没有超新星爆发,所有比铁元素原子量大的元素都将不会存在,类地行星的形成也将是不可能的,而必须依赖类地行星的环境条件产生并繁衍生息的生命现象则更是无从谈起。

由于宇宙中的恒星及行星是宇宙大爆炸以及宇宙长期演化的最终产物,因此宇宙中恒星及行星演化的不可逆性同样是宇宙变化过程的单向性或不可逆性的不可分割的组成部分。宇宙中的所有恒星自形成起直至最终变为不能发光发热的冷暗的形体的整个变化过程同样也是不可逆的。首先,在恒星的演化过程中,由于恒星中氘、氦以及碳等元素的核聚变反应过程产生出的能量中有很大一部分以光子的形式向宇宙空间的各个方向辐射,而这些向宇宙各个方向上辐射的光子又可能被宇宙空间中其他位置上的星云或星体所吸收,从而其过程成为不可逆的,也可以说相应的变化使得宇宙的熵值增大;其次,恒星中不断进行的核聚变的最终结果是除了释放出巨额的能量外,恒星的核心及其附近因为核聚变反应生成原子量越来越大的元素,而要使这些原子量越来越大的元素进行核聚变反应,恒星内部需要具备更高的温度及压力,而一旦恒星的质量小于一定的值,进一步的核聚变反应的条件就不可能出现,大规模的核聚变反应就将终止,结果就会导致恒星的核心的物质因为失去能量的供给而爆发成为超新星、最终成为中子星,随着中子星内部的能量

不断向宇宙空间辐射，经过极其漫长的时间，中子星由于失去能量而最终成为冷暗的形体。其实对于质量更大的恒星，即使其引力之大可以为原子量越来越大的元素的核聚变反应提供条件，但如果原子量越来越大的核聚变反应最终产物是铁元素，则进一步的核聚变反应就无法继续进行，恒星演化的结局同样是超新星爆发，显然恒星的这种演化同样是不可逆的，因为原子量较大的元素中除了其少量的同位素可以通过裂变生成原子量较小的元素外，几乎所有元素都非常稳定。可见，宇宙及恒星的演化过程同样具有不可逆性。以上我们只是简述了宇宙及恒星的演化过程的不可逆性，其实科学家们所进行的大量的天文观察及翔实的科学推理都充分证明了宇宙及恒星、行星演化本身的不可逆性。

通过以上详细论述，我们可以获得如下结论：不可逆性（即方向性）是热力学系统、生命现象以及宇宙及恒星演化等变化过程本身就具有的性质，这种方向性显然不可能由时间的方向性所决定，同时也无法决定时间的方向，因此，热力学第二定律与时间的方向性没有任何关系，从而不可能为时间的方向提供任何箭头。实际上，我们下面第3章将要讨论的不显含时间的物理理论将更加凸显物质的变化过程的各种性质都是其本身所固有的而与时间无关这一特征。在此需要指出的是，由于自然界中描述最基本物理过程的物理方程具有时间反演变换不变性，而描述热力学系统的物理方程不具有时间反演变换不变性，在最基本物理变化过程中，系统的熵值并不随时间而发生变化，从而是守恒量，而任何热力学系统的熵值则随时间的增加而增大，不是守恒量，这也就意味着时间反演变换不改变物理定律或物理方程的数学形式对应于熵的守恒，因此我们可以得到以下重要的结论：**描述基本物质变化过程的物理方程具有时间反演变换不变性，对应于熵的守恒，熵的守恒是描述物质变化过程的物理方程具有时间反演变换不变性的充分必要条件。**由于我们的宇宙是一个热力学系统的宇宙，因此在我们的宇宙中的熵值不是守恒量。

1.7　一切物质的存在及其变化过程都遵循能量守恒定律

能量是用于表征任何一个物质系统所具有的对外界做功能力的最重要的概念，这一概念与我们人类的饮食起居、工业生产等日常生活及社会实践活动的方方面面关系紧密，以至于像时间概念一样的能量概念同样成为了人类知识文明的最基本的概念之一。能量的种类有多种，其中包括动能、势能（有引力势能、弹性势能、分子势能等）等，动能是所有处于运动状态的物体都具有的能量，这样的物体包括宇宙中的所有天体、地球上所有可见的物体如山脉、云朵等以及看不见的（如分子、原子）等物体。由于所有物质都处于永恒的运动之中，因此物质永远具有动能。势能是物体因为发生空间位置的改变而产生的具有恢复到其初始位置趋势的能量，这种能量与力的作用相对应。可见，所有类型的能量都与物质的变化过程是密

不可分的。能量的最重要的特征是守恒性，而能量守恒定律是自然界中所有的物质系统在其变化过程中所具有的最重要的性质之一。能量守恒定律表明物质系统在对外界做功从而失去一部分能量时，该部分能量不会消失，而是从该物质系统的内部等量地转移至该物质系统的外界并且能量的形式不发生变化，或者在转移过程中从一种能量形式转变为另一种能量形式，而该物质系统和与之发生作用的外界之间能量的总和不变，物质系统在对外做功从而失去相应的能量后，该物质系统内部以及物质系统外界显然都发生了某种变化。能量守恒定律是所有物质在其变化过程中都必须遵循的规律，物质变化过程中的能量守恒定律表明了物质变化过程的永恒性，即物质的变化过程永远会持续地进行下去，而不会有突然停止的一天。

与所有自然规律的发现过程类似，在人类历史上，能量守恒定律的发现同样经历了很长的一段时间。人类对能量守恒定律的认识源自对“永动机”的发明。在很早以前，人类就开始考虑利用自然规律为人类的社会实践服务，人类最早所发明的用于实践中的机械都相对简单，这些机械都是由比如轮轴、杠杆等组成，其最大特点是都需要靠人或动物等提供动力，而人或动物需要休息及补充食物，还有生老病死等。因此，人们自然会想到发明不需要外界提供动力自己就会运动起来并且可以永远保持运动状态的机械，这种机械可以一劳永逸地解决动力问题。如在 15 世纪伟大的艺术家、科学家和工程师达・芬奇(Leonard・do・Vinci，1452—1519)就对永动机进行过深入的研究，他曾设计过一种结构非常巧妙的靠水流作动力的机械(也被称做水动机)，但按设计方案制造出来的水动机并没有达到永动的目的。达・芬奇通过对制作出的水动机没有实现永动的原因进行了思考，发现原因在于水动机在工作过程中与水流之间存在摩擦阻力，同时在机械的内部存在相对运动的结构之间也存在摩擦力，正是这些摩擦阻力的存在，使得水动机无法实现永动。当然由于达・芬奇时代还没有系统的力学知识，这样达・芬奇并没有从本质上理解水动机无法永动的原因。而后来的许多发明家都狂热的致力于永动机的发明，虽然有的发明非常巧妙，但最终都被证明是失败的。科学家通过对这些所谓永动机的工作原理的分析发现，如果将这些永动机的设计付诸实践，那么永动机在实际运行过程中，内部机械之间的以及与做功对象之间的摩擦力是根本不可消除的，而正是因为摩擦力的存在使得所谓的永动机是不可能真正实现的。由于制造永动机的不可能性这一结论具有广泛的实践基础，科学家甚至将其作为一条科学的规律确定下来。到了 18 世纪，人类对于这一规律的科学性已经深信不疑，以至于法国巴黎科学院甚至宣布所有关于永动机的发明专利都将不再受理。正是由于对制造永动机的不可能性的正确判断，使得科学家们可以将更多的精力用于思考借助外部动力进行驱动的从而实现对外做功的机器如何可能的问题，而借助蒸汽的驱动

实现对外做功的机器的实现方案就是在这种研究的氛围中产生的，这就是所有能够完全代替人或者动物的体力从而实现对外做功的大型机器的原型——蒸汽机。由于蒸汽机完全靠高温蒸汽的驱动进行工作，因此蒸汽机也被称做“热机”，而此后的各种通过将化石能量转化为机械能，从而能够对外做功的机器都是在此基础上发明的。1824年，法国年青工程师卡诺(Sadi Caront，1796—1832)在如何才能最大限度地提高蒸汽机的做功效率的研究中，将蒸汽机抽象化为“卡诺机”，并将蒸汽机的每一个工作周期归结为具有普遍规律性的四个变化过程，这些变化过程使用的是气体的热胀冷缩这一具有普遍意义的规律，其四个变化过程如下：①一端由可以自由移动的滑块密封的空间内的气体介质吸收热量后温度上升，从而体积发生膨胀；②气体介质体积膨胀后，推动滑块向外移动，对外做功；③将膨胀的气体介质排出密闭空间；④一方面由于惯性使得滑块向内移动，另一方面气体介质冷却降温后体积收缩，从而是热机恢复到其初始的热力学状态为再次对外做功做准备这样一个变化过程。而卡诺机要实现如此的变化过程必定需要高温热源及低温热源两个热源。卡诺通过对卡诺机工作过程的详细分析及计算发现，卡诺机对外做功的效率与两个热源之间的温差成正比，并由此得到著名的卡诺定理。实际上卡诺在对卡诺机的研究过程中就已经对热的运动本质有了初步的认识，而在卡诺之前，科学界普遍认为热是一种物质即热质，也就是说卡诺认为卡诺机实际上就是将热能转化为机械能的装置，并且通过计算给出了热功当量的近似值，不仅如此，卡诺还提出了能量守恒定律的定性描述，但由于卡诺的过早去世，使得他无法完成划时代的发现。后来英国科学家伦福特(Count Rumford，1753—1814)和戴维(H·Davy，1778—1829)对热现象进行了深入研究，先后于1798年及1799年分别通过金属钻削实验以及在真空容器中所作的冰块之间的摩擦融化实验，进一步揭示了热现象的运动本质，从实验上明确否定了之前在科学界广泛流行的关于热的物质说即热素说。到了18世纪初，科学家们通过广泛细致的研究发现，红外线具有热效应，电能与热能之间、电能与磁能之间、电能与化学能之间、电磁能与机械能之间都能够相互转化，而且这些转化都是按一定的比例严格进行的。在此基础上，德国医生迈尔(Robert von Mayer，1814—1878)从自然哲学出发以思辨的方式广泛深入地思考了自然界中各种形式的力之间的转换，包括人体内食物转化为热量以及太阳光的能量被以某种方式存储在植物的种子以及根、茎、叶中等能量的转换形式，并于1842年发表了著名的《力的守恒》的著名论文，全面阐述了自然界中各种能量之间的相互转化。需要说明的是，直到19世纪中叶之前学术界关于能量的概念都非常混乱，并且一直都将能量概念与力的概念混淆。英国实验物理学家焦耳(James Prescott Joule，1818—1889)则从实验角度精确测定了热能与机械能之间相互转化的数量关系，于1843年发表了热功当量的实验结果，确立了热能与机械

能之间相互转化的比例系数。除此之外,焦耳还通过实验还发现了电能同样可以转化为热能,并提出以他的名字命名的关于通电导体的电阻、电流以及通电时间与所产生的热量之间的严格关系,即焦耳定律。德国物理学家及生理学家亥姆霍兹(H. Helmholtz,1821—1894)则于1847年在他的著作《论力的守恒》中首次系统地用物理学的概念及方法系统阐述了热现象、电现象、化学现象与机械力之间的转化以及在转化过程中的量的守恒,并指出"力的守恒"同样可以适用于生物体内各种变化过程。而人类历史上首次明确提出能量守恒定律(热力学第一定律)的是英国物理学家开尔文(Kelvin,即W・Thomson,1824—1907)和德国物理学家克劳修斯(R・E・Clausius,1822—1888),两位物理学家在前人实验研究的基础上建立了相对完善的唯像的热力学理论体系,该理论体系就包括热力学第一定律(能量守恒定律)以及热力学第二定律。热力学第一定律描述了任一热力学系统的内能、所吸收的热量以及系统对外界所做的功之间的数量关系,其内容是:热力学系统在任一变化过程中所吸收的热量Q等于系统的内能的增量$\Delta U = U_2 - U_1$和系统对外界所做的功W之和。热力学第一定律可以自然地推广至所有形式的能量之间的转化的情况,常被称做能量转化与守恒定律:在自然界的任何物质变化过程中所涉及的各种不同形式的能量都能够从一种形式转化为另一种形式、由一个系统传递至另一个系统,而在转化与传递过程中能量的总和不会发生任何变化。能量转化与守恒定律描述了各种能量在相互转化过程中总量上的不变,宣告了永动机的不可能性。而热力学第二定律则对能量之间的相互转化进行了限制,即任何其他形式的能量都可以完全转化为热能,而热能则不可能完全转化为其他形式的能量,正是由于热能与其他形式的能量之间的转化的这一特征使得热力学变化过程成为不可逆的过程,从而凸显了热能与任何其他形式的能量之间在本质上的区别。那么热能的本质是什么呢?由于热力学理论是唯像的理论,是建立在实验基础上的科学体系,因此不可能对热能的本质以及热力学第二定律给出科学合理的解释。后来在克劳修斯、麦克斯韦(James Clerk Naxwell,1831—1879)及玻耳兹曼(Ludwig Boltzmann,1844—1906)等物理学家的努力下,热力学理论体系最终建立在了分子运动论的物质基础上,并且在此基础上,热能的本质以及热力学第二定律得到了科学、系统的解释。从分子运动论的角度,热能从本质上说就是构成物质系统的分子或原子的动能与势能之和。自此,科学家们对热力学第一定律给出了圆满的解释,能量守恒及转化定律、热力学第二定律等成为人类所有科学知识的坚实基础。

除此之外,能量概念及能量守恒定律同样是经典力学中最重要的内容之一,特别是代表经典力学最终形式的哈密顿正则方程及拉格朗日函数就是使用质点体系的能量概念对体系所进行的描述,应该说是质点体系的能量守恒定律的完美表述。在现代物理学中,基本上可以说能量是一个终极概念,自从狭义相对论揭示了物质

的能量与质量之间最深刻的联系之后，将狭义相对论与量子论结合起来的相对论量子力学则进一步揭示了一切物质的能量本质，即所谓的物质实际上是能量的存在形式；并且物理学家借助相对论量子力学发现一切物质粒子都存在相对应的反粒子，粒子与其反粒子之间有着完全相反的物理量及相同的质量：如电荷相反、自旋相反等。当粒子与其反粒子相遇时会发生湮灭，并且根据狭义相对论中的质能关系完全转变为光能，也就是说在某种意义上物质可以定义为被限定在特定结构中的能量，而当正负粒子相遇后，所有的物质结构被瞬间瓦解，能量被释放出来。与之相反，当足够能量的光子通过真空后会导致相应质量的正反粒子（如电子或质子），所有这一切都得到了高能物理实验的不断验证。需要指出的是，即使在上述物质变化过程中，能量仍然会保持其守恒性，由此可见，能量守恒定律是自然界所有物质变化过程的最高原则之一。实际上物理量的守恒与对称性具有深刻的联系，为了证明某一物理量的守恒性，物理学家们所做的工作往往是先对作用量进行某种对称变换，而后将对称变换后的作用量与变换前的情况相比较，如果作用量在某种对称变换下保持不变，那么就会有一个守恒量与之对应。其实，这就是德国数学家阿玛丽·艾米·诺特尔（Amalie Emmy Norther，1882—1935）于1918年提出并证明了的物理学理论中的一条重要定理，即如果作用量在时间平移变换下保持不变，那么能量就必定守恒，通俗地说，如果物理定律不随时间变化，能量就保持恒定；而如果作用量在空间平移变换下保持不变，那么动量就守恒；如果作用量在空间旋转变换下保持不变，那么角动量就守恒。由此可见，能量与时间这两个具有最广泛意义的概念，实际上存在着密不可分的联系，这一点从海森堡不确定关系也可看到。我们知道，任何物理定律都不会随时间的流逝而发生任何微小的变化，因此根据诺特尔定理可知时间具有均匀性，也就是说能量守恒定律与时间的均匀性相对应，并对时间的均匀性提供科学实验方面的有力证据。此外，由于能量守恒定律也是广义相对论中最重要的定律之一，因此，时间的均匀性也应该是广义相对论所描述的弯曲的四维黎曼时—空中时间维度的重要特征，而四维黎曼时—空中时间维度的这一特征恰恰证明了我们在上面第三节中所提出的、完全不同于广义相对论中弯曲的四维黎曼时—空的新的时间—空间结构的合理性，同时也暗示了广义相对论中弯曲的四维黎曼时—空结构是有问题的，必须进行重新诠释。

第 2 章

时间的本质属性

通过以上对物质变化过程的各种性质的论述以及对所有经典的或现代物理学知识的了解我们知道，时间是所有物理学学科都会涉及的最基本的物理量之一，实际上从一开始物理学就用数学方法将时间定义为度量物质变化的尺度。物理学如牛顿力学、电磁学以及相对论等学科凭借时间概念与其他物理学概念等的结合作出了无数重要的、精确的科学预言，而正是基于时间概念才使得物理学成为能够精确预言各种物理量在任一时刻的具体量值的科学（例如，借助牛顿力学可以精确地预测日全食与月全食出现的具体时刻以及太阳系中的各大行星在天空中的具体位置上出现的具体时刻，又例如借助牛顿力学可以非常精确地计算出在什么时间发射火箭可以确保宇宙飞船在预定的时间进入火星轨道并围绕火星旋转等），正如意大利物理学家卡尔罗·罗威利在其科普著作中所说："时间存在于所有或几乎所有经典物理的方程中，它就是符号 t 所代表的变量。那些方程式告诉我们，事件如何在时间过程中发生变化，让我们得以预测在某一未来时间所能发生的事情，假如我们知道曾经发生过的事情。更准确地讲，我们可以测量一些变量，比如某一物体的位置 A，一个钟摆的振幅 B，身体温度 C 等，于是方程式就可以告诉我们，这些变量 A、B、C 是如何在时间过程中发生变化的。也就是说，这些变量说明了在时间 t 过程中所发生变化的函数 $A(t)$、$B(t)$、$C(t)$ 等[①]。"

可以说没有时间概念就没有物理学，更不可能产生出以物理学为基础的现代自然科学；此外，我们还知道时间同样是各种哲学流派最重要的研究对象之一，也是自古希腊起至今两千多年来所有伟大的哲学家都终其一生去努力思考但仍不得其要领的对象，可以说在任何哲学著作中关于时间的论述都是不可或缺的重要内容。时间概念同样与人类的日常生活息息相关，人类的所有生产实践及科学实践等社会活动无不受时间的支配，如学生在学校要按学校制定的作息时间上课；工人在企业要严格按规定的时间上班、下班；火车从一地运行到另一地必须严格按规定的时间发车、按规定的时间到达目的地；飞机从一地飞往另一地也必须严格按规定的时间起飞及抵达目的地；从地球发射宇宙飞船到月球上或太阳系中其他行星上

---

① [意]卡尔罗·罗威利(CARLO ROVELLI). 假如时间不存在？——讲点颠覆常理的科学[M]. 李润，译. 北京：化学工业出版社，2013：90—91.

必须在所谓的窗口期内进行等。时间与我们的一切日常活动都有密切的联系，我们每一天甚至每一时刻都会与之打交道，可以说没有任何一个概念像时间概念一样与人类的各种实践活动都有如此密切的联系，因此康德所认为的时间是人类所有知识及文明最重要的基础之一。但在人类的所有知识中时间的含义又是如此复杂，以至于人们感到对其越来越难以把握，正如比利时物理化学家伊·普里戈金在其著作中所说："在动力学中，时间被当做运动；在热力学中，时间与不可逆性联系在一起；在生物学和社会学中，时间作为历史，我们怎样把这些不同含义的时间相互联系起来呢？这显然不是一件轻而易举的事情。但是我们生活在一个单一的世界中。为了对我们居身的这个世界建立一个统一的观点，我们必须找到某种方法，使我们能够从一种描述过渡到另一种描述[①]。"

时间这个与我们最亲近、最熟悉不过的东西，但对我们而言又是如此的遥远和陌生，因为对于时间究竟是什么的这一问题从古代人类文明开始到现在仍然一直是哲人及思想家们争论不休、无法明白的问题，正如伟大的神学家及哲学家圣·奥古斯丁所说："那么时间是什么？没有人问我时，我倒清楚；如果要我向一个问者解释，我却茫然了。但是无论如何，我确信我知道：我知道如果没有任何事物逝去，则没有过去的时间；如果没有任何事物将要到来，则没有未来的时间；如果没有任何事物存在，则亦没有现在的时间[②]。"一个对我们而言如此熟悉的对象，而我们对其本质特征却无法言说，这的确是令人深感困惑的事情，圣·奥古斯丁对时间的本质的疑惑正反映了从古至今所有对时间进行过深入思考的人们真实的状况，对于什么是时间或者时间的本质是什么的问题历来是而且当前仍然是我们最难以理解的问题之一。

基于我们上面对与时间有关问题的详细讨论的结果，从本章节开始我们就试探性地对时间的本质问题进行详细的讨论，但在讨论时间的本质问题之前必须首先全面、详尽地讨论时间所具有的各种性质，否则，有关时间本质的各种论述都将是苍白无力的，而且对时间意义的把握也不可能是准确的。虽然叔本华在对时间的特征进行总结时罗列了近三十条关于时间的性质，但其中时间的整体性质（如客观性、可感知性及可测量性，相对或绝对性，方向性及流动性，时间的维度等）以及局部性质即时间的连续及均匀性等才是其最基本也是最重要的性质，更是时间的本质的重要内容，而且是解决时间的本质问题的前提，从而在讨论时间的本质是什么这一问题之前我们需要结合前面讨论的结果对时间的这些性质进行全面、详细及深入的分析、思考。

---

① ［比］伊·普里戈金. 从存在到演化——自然科学中的时间及复杂性［M］. 曾庆宏，严士健，马本堃，沈小峰，译. 上海：上海科学技术出版社，1986：2.

② ［英］K. 里德伯斯. 时间——剑桥年度主题讲座［M］. 章邵增，译. 北京：华夏社出版，2011：3.

2.1 时间的客观性、可感知性及可测量性

时间概念是最具普遍意义,同时又是最难以理解的概念之一,特别是如果假定时间是均匀流动的实体从而具有客观实在性,则会直接导致对时间自身的否定:因为在流动的时间长河中除了"现在"这一时刻之外没有什么是真实存在的,过去的时间已经过去从而不存在,未来的时间还未到来从而也不存在,只有"现在"是存在的,但"现在"这一时刻却仅仅是没有"长度"的虚拟、抽象的点从而也可以认为是不存在的,由此似乎可以得到所谓的"时间长河"或时间之流是根本不可能不存在的这样的结论。但如果时间是不存在的从而不具有客观性,那么在经过漫长的时间等待后某个人或某件事迟迟没有出现时我们为什么会有焦虑或烦躁感?在承受某种煎熬时我们为什么会有度日如年的感受?而当我处于睡眠状态从而在我的感觉中时间的流逝似乎已经停止的情况下,处于清醒状态的他人所感觉到的时间的流逝对我而言意味着什么?在我没有出生之前或者我离开这个世界之后时间的流逝一直在或仍然会持续进行吗?我们通常使用钟表测量的究竟是什么?考古学家通过对某一化石中^{12}C的测定所确定的该化石形成的年代指的又是什么?宇宙学家认为宇宙是远在人类出现之前甚至地球形成之前的138亿年前从宇宙空间中的一个点上产生出来的,这远超出我们人类想象的138亿年的时间仅仅是科学家想象中的东西吗?要回答这些问题必定会涉及时间究竟是否具有客观性、时间能否被我们所感知和测量等问题,这就要求我们对时间的客观性、可感知性及可测量性等时间的重要性质进行全面的思考。

2.1.1 时间的客观性

通过前面的讨论我们知道,一切物质的存在及变化过程都具有时间性,即使这一变化过程所需要的时间非常短暂。因此,没有任何物质的变化过程可以在瞬间完成。如现代宇宙学提出宇宙作为一个整体呈现出当前这样难以想象的规模不是在一瞬间完成的,而是已经经历了138亿年的时间;而科学实验发现中性π介子存在的寿命虽然极其短暂(短暂的完全可以用一瞬间来形容),但仍然需要大约1×10^{-18} s的有限时间等等。因此可以说物质的变化过程离不开时间,没有时间就不可能有任何物质的变化过程发生,甚至宇宙中的一切物质都不可能存在,这一点与迄今为止人类的所有科学实验及科学观测完全一致。这也就意味着时间并非我们强加于物质及其变化过程中的虚拟参数,而是一切物质的变化过程所具有的、不依赖于人类意识的对象,我们对任何物质完成其变化过程所需要的时间进行测量的行为,并非意味着将时间赋予这些过程,而是采用具有时间性的周期性变化过程,将一个个标准的周期赋予需要测量的变化过程,从而对这些物质完成变化过程所需要的时间数量化。同样的,时间也不可能脱离物质的变化过程而独立的存在。

由于时间看不见、摸不着，无法直接被人类的任何观测手段观察到，更确切地说时间并非一种物质性的事物(实际上时间是一切物质变化过程的属性)，因此没有独立存在的基础从而不可能脱离物质的变化过程而存在。虽然，在我们的想象中可以把时间作为一个完全不同于其他事物的概念，从物质的变化过程中分离出来并对其进行分析、思考，但时间作为所有人类知识的最基本的概念，并非凭空从人的大脑中产生出来的，而是人类在长期的实践活动从对各种物质的变化过程的认识中抽象出来而获得的一个概念，从而时间具有客观性。这一点从人类的时间概念的形成过程也可以看出，对此，罗嘉昌先生从皮亚杰的发生认识论角度对时间概念的过程进行了论述："人类所特有的时间意识乃是长期的社会实践的产物，而非单纯是生物进化的结果。皮亚杰的发生认识论的研究表明，人的时空概念不是先天的，而是来源于实践的操作；仅当儿童的思维发展进入具体运演阶段，动作或操作发生了内化，才逐渐形成时间、空间、因果性等概念。回顾远古的人类，同样有个'不数日月，不志四时'的阶段。只是由于人们长期的'日出而作，日入而息'，将太阳的升落与劳动的开始与结束联系起来，才逐渐形成'日'的时间单位，形成'旦'(太阳升出地平线)、'暮'(日落)等特定的时刻概念和'旦早于暮'这类时序概念。根据甲骨文的记载，'出日'和'入日'是殷人表示早晚时间最基本的词汇，人们要在这两个重要时刻祭礼。这说明，时间观念的形成，从开始就是同人们的社会实践活动联系着的。它不可避免地受到生存活动中各种因素的制约，既包括理性的因素，也包括情感的、心理的因素，乃至像宗教这样的非理性因素[①]。"由此可见，时间概念的形成过程也从一个侧面反映了时间的客观性，也就是说时间概念并非如德国哲学家康德所说是人类与生俱来的、固化在人类的认知结构中的内感官形式，就人类社会而言，时间概念是在长期实践活动中逐渐形成的，而对每一个人类个体而言，这一概念则是在人的婴儿期到儿童期这段时间内通过对生长环境及其中发生的各种物质变化过程的反复观察、探索而形成的。因此，时间作为依赖于物质及其变化过程而存在的对象，不依赖于人的意识而存在并且不以人的意志为转移，从而时间的存在具有客观性。可以说一切物质的变化过程都具有时间性是时间具有客观性的最有力证据。

另外，由于时间不能够脱离物质的变化过程而存在，从而对时间的理解及测量必须而且只能在物质的变化过程中才有可能，脱离了物质的变化过程，关于时间的任何问题都是无法理解、也是不可想象的。如古人使用日晷测量时间是借助太阳相对于地球的运动造成日晷在地面上的投影的变化实现的；又如，我们在生产实践中对时间的测量就是借助机械钟表钟摆的周期性摆动实现的，科学实验中使用高

---

① 罗嘉昌.从物质实体到关系实在[M].北京：中国人民大学出版社，2012：100－101.

精度原子钟对时间的测量是使用特殊原子在规定条件下在两个特定的能级之间跃迁时所辐射的电磁波的周期为基准实现的；再如，我们想象的在空无一物的空间中发生的所谓时间的流逝其实就是我们借助我们自身体内的生物钟所进行的想象性的计时。虽然如此，但我们要把握、理解时间，就必须在思想中将其从物质的变化过程中分离出来，只有这样我们才能将其作为一个不同于物质变化过程的概念进行研究、思考。关于人的思维是如何通过物体在空间中的运动过程来抽象的把握、理解时间的，德国哲学家黑格尔及苏联社会主义革命领袖列宁对此都有过精辟、细致的描述，正如王鹏令先生在其《时—空论稿》中的相关引述："黑格尔在分析芝诺的二分法疑难时曾经指出：运动（实即宏观机械运动）是时间与空间（实即宏观时、空）的统一，时间和空间作为运动的两个环节不可分割的相互联系着。但人为了把握运动，又不得不把它们分割开，'如果不把不间断的东西割开，不使活生生的东西简单化、粗造化，不加以割碎，不使之僵化，那么我们就不能想象、表达、测量、描述运动。思维对运动的描述，总是粗造化、僵化。不仅思维是这样，而且感觉也是这样，不仅对运动是这样，而且对任何概念也都是这样'（转引自列宁的《哲学笔记》）。'时间'和'空间'这两个概念，就是人们在对运动进行分析时，把运动本身的两个环节切开，并使之僵化所造成的。可是这样一来，时间和空间似乎又成了彼此独立的存在物，时、空之间的联系，时空作为一个统一的整体，这些反倒成为难以理解的了。其实，这种困难正是人自己的思维做造成的：'造成困难的永远是思维，因为思维把一个对象在实际里紧密联系着的诸环节彼此区分开来'（转引自黑格尔的《哲学史讲演录》[①]。"可见，唯心主义哲学家所说的只存在于我们的思想里并独立于物质变化过程的所谓绝对时间，完全是从物质的变化过程中抽象出来的概念，从而时间作为客观存在的对象不可能独立于物质的变化过程而存在。这也就意味着时间与物质的变化过程之间存在不可分割的联系，因此时间必定具有客观性，时间的客观性与物质及其变化过程的客观实在性密切相关，并通过物质及其变化过程表现出来。

时间作为一个能够借助周期性摆动的具有客观性的钟摆或其他能够精确重复的周期性现象进行间接测量的物理量，必定像所有其他可以借助相应的仪器、仪表进行测量的物理量一样具有客观性；而如果认为时间是纯粹主观的产物，那么所有关于时间的测量结果都将是虚幻的、没有任何意义的。如此测取的时间能够用于对各种自然现象进行精确描述，这本身就说明时间不可能是主观的内容。因为主观意识极易受到意识主体的内部及外部各种复杂因素的影响，从而导致一切纯粹主观的内容都不可能有一个统一的标准并用于科学的精确描述。实际上，即便是

---

① 王鹏令. 时—空论稿[M]. 北京：人民出版社，1985：107.

人类意识中那些主观性的东西也不可能是人类意识中先天就具有的，而是具有其客观的物质基础，是外部世界作用于人的意识中所形成的具有主观形式的外在世界的影像，而对于时间这一对象的认识也是如此。时间作为人类知识结构中最重要的概念及对象在人类所有生产实践及科学实践活动中都是不可或缺的，并已渗透到了人类实践活动的所有领域（甚至神秘的宗教领域在进行各种宗教活动时，也都会强调时间、特别是某些特殊的时刻的重要性，并认为在这些特殊的时刻所进行的宗教活动会对活动的结果产生至关重要的影响）。可以说脱离了时间概念及支持这一概念的严格的计时体系，我们所有的社会实践活动都将无法正常进行，甚至我们日常的语言交流以及科学的论述、思维等等都将是不可能的。由于时间概念在人类几乎所有的实践活动领域都大量使用，有着坚实的经验及科学的基础，对于这样的对象如果我们竟然会认为它仅仅只是人类纯粹想象的、完全虚幻的东西，那才真正是不可思议、不可想象的事情，因此我们必须坚持时间具有客观性的观念，即时间概念必定与确定的客观对象相对应。而如果否定了时间的客观性，也就必定意味着否定了一切物质的变化过程都具有时间性的事实，而如果一切物质的变化过程不具有时间性，那么，所有具有或不具有因果关系的事件都将会同时发生，而且所有物质的变化过程都将在同一瞬间完成，此后或者再也不会有任何物质的变化过程发生，或者所发生的物质的变化过程与此前发生的所有物质的变化过程没有任何逻辑上的或因果上的联系，一切发生的物质变化过程（由于物质变化过程的完成不需要时间，实际上连变化的过程都不可能出现，从而根本不存在也无法观察到任何物质的变化发生）都将是各自独立、杂乱无章以及无法预测的；如果实际的变化过程没有时间性（即变化产生的同时就结束了），那么，我们就无法观察到这些过程，而且必然在这种情况下甚至连生命现象都是不可能存在的，最终的结果，将是所有科学中存在的因果判断或者因果解释会失去根基，科学也就失去了存在的理由。如果否定时间的客观性而同时认为时间只是存在于人的意识中的虚幻对象，结果就会如美国哲学家 L. M. 昂格尔所说："假设时间是虚幻的，它不过是人类主体性的附带特征，而非自然的某种客观属性，这样一来，如果我们不是自我欺骗，就无法作出因果判断或为时间提供因果解释，因为所有的关系都将同时发生。世界的真实结构将成为相互间同时制约的网络。如果我们称这种网络为因果性，我们就是在玩文字游戏。真正看到的世界将是只有某种超脱于死亡和有限拖累的神意才能记录的永久副本。因此，不仅因果关系将毫无根据，而且我们经历的生命本身——我们从诞生到死亡的可怕而惊异的历程——也将成为一种幻觉[①]。"

① [美]罗伯托·曼加贝拉·昂格尔. 觉醒的自我——解放的实用主义[M]. 谌洪果，编译. 北京：北京大学出版社，2010:68.

在人类历史上很多哲学家、思想家都坚持认为时间具有客观性，并且对时间的客观性都有深刻的论述。如古希腊时期开始，就有哲学家在思考关于时间的问题并坚持认为时间具有客观性，早期希腊米利都学派哲学家赫拉克利特就是其中的一个代表。赫拉克利特说："……时间……在具有尺度、限度和过程的秩序中运动。在这些过程中，太阳是时间的管理者和监护者，因为是它规定、裁决、揭示并照明变化，而且，它还带来了产生万物的季节[①]。"又说："时间是个玩跳棋的儿童，王权执掌在儿童手中[②]"，显然，这些关于时间的观点基本都采用拟人化的手法描述时间的特征，这样的描述方式是人类进入文明社会的早期的显著特点。虽然如此，但在这些关于时间的观点中，仍然可以看出赫拉克利特明显倾向于时间具有客观性的观念。又如古希腊最伟大的哲学家亚里士多德同样也持有时间具有客观性的观念，并且对时间具有客观性的观点进行了详细的论证，如亚里士多德认为："时间既不是运动，也不能脱离运动[③]。"又说："时间不是运动，而是使运动成为可以计数的东西[④]。"而谈到时间与人的意识的关系时亚里士多德这样回答，"可能有人要问：如果意识不存在，时间是否存在呢？所以会产生这个问题是因为，如果没有计数者，也就不能有任何事物的被数，因此显然不能有任何数，因为数是已经被数者或能被数者。如果除了意识或意识的理性而外没有别的事物能实行计数行动，那么，如果没有意识的话，也就不可能有时间，而只有作为时间存在基础的运动存在了（我们想象运动是能脱离意识而存在的）。但运动是有前和后的，而前和后作为可数的事物就是时间[⑤]。"按亚里士多德的观点，即使不存在意识，但运动是有前和后的，而前和后作为可数的事物就是时间，从而时间作为运动的数或运动的尺度同样存在，这也就是说时间是不依赖于意识而存在的，从而具有客观性。

马克思的辩证唯物主义则更是坚持时间的客观性的观念，正如李秀林先生等编著的教材《辩证唯物主义和历史唯物主义原理》中所阐述的："时间与空间作为运动着的物质的存在形式，它们同物质运动是不可分离的。一方面，时间和空间离不开物质运动，离开物质运动的时间空间是不存在的。时间是以物质在空间的运动来度量和认识的，离开物质在空间的运动，它就成为无法度量、神秘莫测的东西；另一方面，物质运动也离不开时间和空间，离开时间和空间的物质运动也是不存在的。时间和空间同物质运动的不可分离性，表明了时间和空间的客观性，表明它们

---

① 苗力田.古希腊哲学[M].北京：中国人民大学出版社，1989：44.

② 苗力田.古希腊哲学[M].北京：中国人民大学出版社，1989：51.

③ [古希腊]亚里士多德.物理学[M].张竹明，译.北京：商务印书馆出版，1997：124.

④ [古希腊]亚里士多德.物理学[M].张竹明，译.北京：商务印书馆出版，1997：125.

⑤ [古希腊]亚里士多德.物理学[M].张竹明，译.北京：商务印书馆出版，1997：136.

作为物质运动存在形式同物质运动一样，也是不依赖于人的意识的客观存在[①]。”而由于时间是一切近代、现代科学特别是物理学中最基本的概念，并且描述一切物质的变化过程都需要借助时间概念，因此几乎所有的科学家同样都坚持时间具有客观性的观念，如人类历史上最伟大的科学家牛顿在其科学巨著中提出：“绝对的、真实的、数学的时间。这种时间由其本身的特性所决定，它均匀地流逝着，与外在的所有事物没有任何关系[②]。”可见，牛顿除了坚持时间具有客观性之外，还认为时间具有脱离物质及其运动而独立存在的实在性，在下面的章节中我们将证明时间的实在性观念是错误的。同样的，德国物理学家爱因斯坦也坚持时间具有客观性的观念，如虽然在狭义相对论中爱因斯坦认为时间具有相对性，即在存在相对运动的两个参照系中用所在参照系中的时钟测得的时间是不同的，但这种测量值只与两个参照系之间的相对运动的速度有关而完全不依赖于参照系中的观察者的意识。特别是在建立广义相对论的过程中，爱因斯坦更加坚定地坚持时间具有客观性的观念，如爱因斯坦 1916 年 10 月 31 日在给好友贝索的信中这样写道：“空间和时间的客观意义首先在于：四维连续区是双曲面性的；因此，从每一点出发，都有‘时间的’（即 $ds^2>0$）和‘空间的’（即 $ds^2<0$）线元……当然，这样的选择并没有任何客观论据。不过，‘空间’特征和‘时间’特征却都是实在的[③]。”在此，爱因斯坦的结论显然是依据广义相对论作出的，而在广义相对论中：“物质的存在造成时空的弯曲，弯曲的时空又会反作用于其中的物质，影响物质的运动。在广义相对论中，作为‘演员’的物质和作为‘舞台’的时空，不再是互不相关的，而是相互影响的。不过，在相对论中，物质消失后，时空不会消失，时空依然存在，只不过由弯曲变成了平直[④]。”由此可见，爱因斯坦不但主张时间具有客观性，而且更进一步坚持时间还具有实在性的观念。而爱因斯坦之后的物理学家为建立量子引力论则更进一步提出四维时空中的时间不仅在宏观尺度上具有弯曲、莫比乌斯螺旋等复杂结构，而且在微观尺度上甚至还会发生量子涨落，出现量子泡沫并形成虫洞及多联通宇宙等复杂的拓扑结构。上面列举的以及其他不能在此一一列举的所有坚持时间具有客观性的哲学家及科学家对时间具有客观性的问题都有过深入的思考及详尽的论述，他们的论述以及坚定的信念都为时间具有客观性的观念提供了强有力的支持。时间的客观性是时间最重要的性质之一，正因为时间是客观的而非人类意识的主观对象，我们才能将时间作为一个独立于我们意识的对象去认识和把握。

---

① 李秀林，王于，李淮春．高等学校文科教材——辩证唯物主义和历史唯物主义原理[M]．北京：中国人民大学出版社，1982：44．

② [英]艾萨克·牛顿．自然哲学的数学原理[M]．曾琼瑶，王莹，王美霞，译．南京：江苏人民出版社，2011：7．

③ [美]爱因斯坦．爱因斯坦文集第一卷[M]．徐良英，李宝恒，赵中立，范岱年，编译．北京：商务印书馆，2010：142．

④ 刘辽，赵峥，田桂花，张靖仪．黑洞与时间性质[M]．北京：北京大学出版社，2008：223．

2.1.2 时间的可感知性

所谓的感知，即物质对象作用于人的感官后，由感官产生的相应的信号通过神经网络传入人的大脑中并在大脑中形成对象的影像的心理活动。而所谓的对象具有可感知性，是指对象所具有的能够与人类的感官之间产生相互作用(从而出现生理上或心理上的变化)，并最终在大脑中形成对象的影像的特性。需要指出的是，时间的可感知性本质上而言是时间性的可感知性，是时间性本身所具有的、能够被人的综合感知能力所把握的性质，因而，对时间的感知，其实就是对物质的存在及其变化过程的时间性的感知。当然，对时间具有感知能力的不仅仅只有人，在某种意义上，动物甚至植物都具有感知时间特别是感知时间性的能力，这是一种本质上而言能够借助体内的生物钟对物质变化过程的时间性进行测量的能力。时间的可感知性就是指个别的、具体的物质的存在及变化过程的时间性可以成为被感知的对象，从而为我们人类的感官所把握。具有客观性的时间，之所以能被我们所认识，就是因为时间具有可感知性，从而能够被我们的感官所感知。

由于一切物质的存在及其变化过程都具有时间性，而且时间不可能独立于物质的变化过程而存在，因此时间是一种具有普遍性的对象，从而不可能感性地存在，这也就意味着，我们不可能从感性经验中直接体验时间，也即时间不可能如物质及其变化过程一样被我们的感官所直接感知。而作为具有普遍性的时间却由作为部分的、个别的物质的存在及其变化过程的时间性所构成，每一物质的存在及其变化过程都通过时间性呈现出来，正是这些具体的物质的存在及其变化过程感性地存在着。但时间并非也不可能以实体形式存在，不可能直接作用于我们的感官，从而不可能被我们的感官直接感知，那么我们对时间的感知是如何产生的呢？实际上，人类除了具有借助感官能够直接感知外界事物存在的能力之外，还具有能够间接认识事物内部或事物之间关系的能力，而时间就是在物质的变化过程中从物质由一个状态过渡到另一个状态的过程中呈现出来的，即当我们将物质的变化过程——从一个状态过渡到另一个状态的这种情况看做是变化的结果时，从一个状态到另一个状态所需要的时间就凸显出来，变化过程所具有的时间性就因此被我们所认识。我们知道，一切物质的变化过程都具有时间性：如地球完成绕自转轴自转一圈的变化需要约 24 小时的时间；电磁波完成从地球到月亮的路程约需要 1.27 秒的时间；地球自诞生之日起到现在已经过去了大约 45 亿年的时间；宇宙从产生到现在已经存在了大约 138 亿年的时间；虽然亚原子粒子的衰变时间可以达到微秒级，但亚原子从产生到消失的变化过程仍然需要时间；等等。而正是这些具有时间性的物质在变化过程中出现的每一个状态，作为一个个按一定的顺序发生的事件，不断作用于我们的感官后被我们所感知，使得我们能感知到或者是同时出

现、或者是按一定的顺序依次发生的一个个事件，从而使我们认识到了物质变化过程所具有的时间性，并进而使得我们间接地感知到了时间。可以说，一切物质的变化过程都具有时间性是时间具有可感知性的物质基础。我们不仅被动地感知着时间，而且，在对未来的期待中，我们能够更强烈地感受到物质变化过程的时间性：我们从早上到工厂上班起，伴随着紧张忙碌的工作就开始期待着下班时间的到来；我们过年回老家时，从上火车起我们就处于等待之中，等待着火车到达目的地；我们年幼时总是对未来充满幻想及期盼，在幻想与期盼中我们感知着时间；在科学实验中当我们创造了合适的条件后开始期待理论所预言的结果完美呈现，而正是在对所希望的结果出现的急切地等待中我们感知着时间，等等，从而在对未来的期待中，我们间接地——而不是像对物体的感觉那样直接地——感觉到了时间的存在。可见，时间的可感知性是间接的而非直接的，时间只能被我们间接地感知到，我们之所以能够认识时间并最终形成时间概念，就是因为时间具有可感知性。

由于时间的可感知性是时间所具有的通过物质的变化过程与人的感官之间产生间接的相互作用并能够被人感知的属性，因此这种性质与认识的主体——人是不可分割的，而正因为具有可感知性，时间才能够被我们所感知并且能够被“内化”为我们的时间意识。关于人类对物质变化过程的时间性的感知，特别是人类的时间意识的起源等问题，法国哲学家胡塞尔从现象学的角度对其进行了详细的分析及论述，胡塞尔认为，想象在人类的时间意识的起源方面具有至关重要的作用。胡塞尔在其《内时间意识现象学》中用旋律表象的产生过程进行类比描述了时间表象在人的意识中的产生：“当一个旋律响起时，单个的声音并不会随着刺激的停止，或者说，不会随着由它引发的神经活动的停止而完全消失。当新的声音响起时，前行的声音并非无影无踪，否则我们就不能注意到相互跟随的声音关系，我们在每一个瞬间就会只具有一个声音，也可能在两个声音发出之间的间域时间(Zwischenzeit)中具有一个空乏的休止，但永远不可能有对一个旋律的表象。另一方面，声音表象在意识中的留存还不仅仅是这种状况。倘若它们始终没有变异的话，我们所具有的便不是一个旋律，而是一些同时发出的声音的和音了，甚至更多是一个不和谐的噪音了，一如我们同时敲响所有已经响过的声音时所听到的那样。每个声音感觉在那个使它得以产生的刺激消失后还从自身中唤起一个相似的、并带有一种时间规定性的表象，而这个时间规定性在继续变化，这是一种独特的变异，只有在这种变异出现时，对一个旋律的表象才会形成，在这个旋律中，单个的表象具有其特定的位置，并且具有其特定的时间度量。因而这是一个普遍的规律：每个被给予的表象在本性上都会有一个连续的表象系列与之相连接，其中的每个表象都再造着(reproduzieren)先行的表象的内容，但却是以这样的方式：它始终把过去的因素附着在新的表象上。这样一来，想象在这里便以独特的方式表明自己是原创性的

(produktiv)。摆在我们面前的唯一情况就是:想象创造了一个实际上是新的表象因素,即时间因素。因而我们在想象领域发现了时间表象的起源①。"从以上分析及论述的过程可以明白,在我们对各种物质变化过程的时间性进行感知并最终形成时间表象的过程中,外界事物对人的感觉神经的刺激以及这些作用在我们的大脑中形成的记忆是必不可少的两个环节,其中记忆这一环节尤为重要。心理学实验证明,失去了长期记忆而仅仅只有短期记忆的患者,只能具有最近几分钟甚至几秒钟之前所发生的事情的记忆,即使对自己的亲人,患者也不可能有其过去的任何相关记忆,也就是说只具有短期记忆的人甚至可能无法感知到"时间的流逝",更不可能形成时间的概念,因此,对于具有短期记忆的人而言,时间并不具有可感知性。这也就意味着记忆对我们感知时间至关重要,是我们对时间产生感知乃至认知的心理学基础。

2.1.3 时间的可测量性

时间的可测量性是指任意的时间间隔所具有的可以借助计时工具(时钟)对其进行测量从而获取相应的测量值的性质。时间具有可测量性这一性质是显而易见的,我们人类社会所建立的严密、完备的计时体系每时每刻所进行的测量都向我们清楚地表明时间具有可测量性,如果时间不具有可测量性,那么我们的任何计时体系的建立以及对时间所进行的哪怕最简单的测量既不可能更不可想象,从而我们建立在对时间精确测量基础之上的现代科学也将不复存在。既然时间具有可测量性,那么如何才能实现对时间的测量,或者对时间的测量是如何可能的?由于任何事物的变化过程都具有时间性,并且物质及其变化过程就是一切,因此,我们必须而且只能借助物质的变化过程来实现对时间的测量。对此,存在主义哲学也有自己独到的见解,如黄裕生教授在其著作中所进行的相关论述就深刻诠释了对时间测量的可能性以及实现这种测量的具体方法:"被希腊人据以领会和确定时间的运动事物不仅是作为自身的存在者,而且更重要的是作为某种什么的存在者。因为只有在关联中作为某种什么出现(来相遇)的存在者,才能显示出其运动和变化的意义,并因而才能发挥定时或计时的作用。比如太阳只有在与光明、黑暗、山脉或地平线处于关联中,太阳的升落及其运行位置才具有计时和定时的功能②。"也就是说我们必须将两个或两个以上具有相对运动的事物关联起来后相应的关联物才能够发挥定时或计时的作用。由于任何一个能够严格反复重现的周期性的物质变化过程具有时间性,同时我们总是可以将周期性的变化过程中相对运动的对象关联起来,比如在时钟指针的周期性旋转运动过程中,我们可以将指针与钟面上固定

---

① [德]埃德蒙德·胡塞尔.内时间意识现象学[M].倪梁康,译.北京:北商务印书馆,2009:41—42.

② 黄裕生.时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M].南京:江苏人民出版社,2012:122.

不变的刻度线关联起来，从而实现对时间的计量。实际上，自然界中存在的许多现象都可以作为计时体系实现计时功能，如美国科学家罗伯特·兰札和鲍勃·伯曼在著作中所描述的："自然中一切可靠的循环事件都可以（有时候是必然）用来跟踪时间的进程。潮汐、太阳的运转、月亮的相位，都是某些最有意义的自然周期性时间。甚至普通和日常自然事件也可以用来测量时间，虽然不如时钟准确。冰地融化、成长中的儿童、地上正在腐坏的苹果——几乎所有东西都可以用来测量时间。人为事件也可以利用。例如陀螺旋转一会之后停了下来。你可以把这个现象与热天中的一个标准冰块作比较，并计算出陀螺的旋转与冰块融化的数量之比，也许陀螺旋转 24 周等于一个冰块的融化。于是我们可以得出结论，每一个融冰'日'等于 24 周陀螺旋转'小时'，然后想出一个跟芭芭拉约会喝茶的安排，为时两个半的冰融或 60 个陀螺旋转，视你们两人谁有可支配的'时间段'而定。很快就能看出，没有变化的事件，什么都不会发生。因为我们发明了叫做时钟的物体，所以人们承认时间是以物质实体存在的，而时钟比花蕾的绽开或苹果的腐坏更有节奏、更均匀。实际上，真正发生的完全是运动——这种运动就是当下此时的最终限定[①]。"因此我们可以而且只能利用周期性的物质变化过程制作的计时工具（如时钟），才能可靠实现对时间的精确测量，而要做到这一点所需要的仅仅只是在计时工具中产生周期性变化过程并对该变化过程的每一个周期进行计数即可。由于能够严格重复的周期性变化过程完成每一个周期所需要的时间都相等，因此，可以将这样的周期性变化过程中的每一个过程都作为测量时间的标准（计时单位），同时把任何一个物质的变化过程与该标准进行比较，我们就可以像用标准的米尺测量一条直线上任何两点之间的距离那样，测量任何一个物质的变化过程的时间性，或者，如果这种测量并不针对任何一个物质的变化过程，而只是进行单纯的计数时，我们就可以认为这是在对时间本身进行测量，即借助时钟的周期现象所产生的基本计时单位——秒、分、时——对某一变化过程所对应的时间间隔或一个个事件的发生对应的时刻进行测量，从而得到一个时间数值或一个时刻序列。因此，对于任意的时间间隔，我们都可以通过对时钟的一个个最基本的周期性变化过程的计数实现对该时间间隔的赋值，从而可以说任何时间间隔都具有可测量性，而时间具有可测量性的根本原因则是一切物质的变化过程都具有时间性。由于对时间的测量是采用具有时间性的标准的周期性物质变化过程进行的，因此，所说的测量时间在本质上就是用标准的物质变化过程对需要测量的物质变化过程进行测量，测量的结果是被测量的变化过程具有多少个标准的计时单位，这就意味着我们只能对时间进行间

---

① ［美］罗伯特·兰札（Robert Lanza），鲍勃·伯曼（Bob Berman）. 生物中心主义［M］. 朱子文，译. 重庆：重庆出版集团重庆出版社出版，2012：87.

接的测量，正如叔本华根据时间与空间之间的对等关系对时间、空间的各种性质所进行的总结中提到的(转引自吴国盛著作)："时间不能通过自身而被直接测量，只能通过在时间和空间中的运动间接地测量：比如，太阳和钟表的运动测量时间。空间可以通过自身而被直接测量，也可以通过时间和空间中的运动间接地测量；比如，一个小时的行程，以光年表述恒星的距离①。"由于我们不能用时钟对时间进行直接测量，或者说我们用时钟测得的并不直接就是时间，因此，相对论中所说的时钟周期的变长、时钟的变慢这一现象并不能直接等同于时间的变慢，从而并不能直接证明时间的变慢。

从对时间的测量过程可见，人类社会要实现对时间的精确测量并据此进行相互间交流，能生成稳定计时单位的计时工具以及计时单位的统一化及标准化是必不可少的，但历史上对所采用的基本计时单位的定义也不是一成不变的，随着社会的发展及各种实践活动的需要，人们必须使用更稳定的物质的变化过程来定义基本的计时单位。例如对基本计时单位"1 秒"最早的定义是一个平太阳日的 1/86400，这一定义是利用地球的自转进行的，其前提显然是假定地球的自转具有高度的稳定性，但天文学更精确的测量数据表明地球的自转存在不规则的变化，具体表现在：由于太阳系中太阳及其他行星的引力作用，特别是月球的引力作用以及地球上大气的无规律流动、动植物的生长及运动等等诸多复杂因素的影响，不仅地球自转的速度是不均匀的，而且地球自转轴与地球的公转轨道所在平面的夹角也是变化的(即所谓的极移现象)，正是这种不规则的变化会造成计时单位的相应变化，并且最终会影响到时间测量的精度。自人类社会进入 20 世纪后，随着科学技术的发展以及人类对时间测量精度要求的提高，对计时工具稳定性的要求也随之提高，原先的基本计时单位显然已经无法满足社会需求。为提高计时单位的精度从而提高对时间测量的精度，科学家又将铯－133 原子在基态的两个超精细能级结构之间的零磁场跃迁时对应于辐射频率的 9192631770 个周期所持续的时间定义为 1 秒。高精度的计时单位为一切理论科学的研究和应用科学中时序的测量提供了精确的时间坐标。另外，人类历史上出现的各种标准计时单位的定义也不是随意的，而是根据社会生产实践活动的需要对自然界中某些能够对人类的实践活动产生重要影响的、规律性的现象进行长期观察、总结并且伴随相应的计时方法及工具而制定出来的，这些被人类精心制定出来的计时单位反过来又对人类的生产实践活动进行严格的规范。在进入文明社会之前的漫长时间里，由于没有任何测量手段和工具，因此，根本不可能有任何计时单位被制定出来，在这种情况下人们完全凭感觉估计时间。科学实验证明，不同的人甚至同一个人由于所处的环境不同、经历不

① 吴国盛.时间的观念[M].北京：中国社会科学出版社，1996：165.

一样，对具体时间的感知结果也会不同。下面是英国科学家在本世纪初所作的心理学方面的研究："2001 年英国伦敦大学学院的两名科学家进行的研究显示，每个人的生物钟与他人的都不尽相同。我的生物钟的步调并不总与你的相一致。每个人的时间感都各不相同，至少部分取决于我们的感官是如何向我们描述外部世界的。……研究结果显示我们的时间感是易变的，至少部分与我们在外部世界所经历的活动有关①。"该研究显然支持了我们所有人对时间的感知都是不同的观点。因为仅凭借感官及直觉对具体时间的感知是粗糙、模糊的，由此产生的知觉结果与现代文明社会的计时工具的测量结果相比其偏差远远超出人们的想象，这种情况显然不能满足人类文明社会的需求，因而必须采用具有客观性的、统一的测量时间的工具，正如英国物理学家 B. K. 里德雷在其著作中所说："我们不用自己体内发生的事情来作参考，因为时间的测量应该与别人交流，而两个人所感觉的各自的时间不可能很精确地一致。所以，我们需要依靠一种公共的事件序列来决定时间，就是说需要一条时间的轨道，那就是钟②。"进入文明社会后，为获得整个人类社会都能接受的统一的时间测量值，从而规范公众的行为，人类经过长期的观察发现，具有均匀性或周期性的物质变化过程可以作为测量时间的标准——计时单位。天体运动的周期性现象是早期人类文明对自然界最简单的规律性认识，古人通过长期的实践活动发现了太阳的永恒不变的周期性升落现象。由于与人类的关系是如此密切、对人类每一天的生存活动的意义又如此重要，因此，太阳的周期性东升西落现象一开始就作为人类计量时间的方法被人们广泛采用。存在主义者从存在主义角度对早期人类为何以及以如何太阳周期性的东升西落为活动准则进行了论述，以下观点引自黄裕生教授的著作："时间性（此在的存在）的非本真到时虽然能够以任何一个（作为'什么'的）存在者为'参照系'，但它通常是以作为放送光明的太阳为'参照系'。时间性借太阳这一'参照系'这样到时或说这样解释自己：现在日头当空，是休息的时候；而刚刚还是旭日东升，是工作的时候，而后太阳西沉，该回家了。时间性借太阳这一参照系解释自己，也就是时间性以非本真样式到时，即作为非本真的时间（遗忘自身有所期待的当前化）到时。在这种解释中，时间性把自己确定或计算为：是做……时候和不是做……时候。时间性借助于太阳及其运动位置的这种自我解释或自我计算对于相互共在于同一天空下的每个人来说，都是可行的。因此，海德格尔认为，在时间性的这种自我解释中，时间被公共化（Veroffentlichung）了③。"而由于白昼与黑夜之间有明显的区分，早期人类为计量日期的便利，很自然地将太阳每一次的升落规定为 1 日。存在主义者对此同样进行了精

---

① 严炎，刘星．我们的时间感从何而来[EB/OL]．[2013—03—04]凤凰科技．

② [英]B. K. 里德雷．时间、空间和万物[M]．李泳，译．长沙：湖南科学技术出版社，2002：57．

③ 黄裕生．时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M]．南京：江苏人民出版社，2012：130—131．

彩的论述:"在时间性以太阳作为'参照系'进行自我定期(Datieren)——自我解释自我计算——中,'生成出了最自然的时间尺度,即日'。也就是说,在这种情况下,时间性是以日——太阳的东升西落来计算自己解释自己的。在这里,作为太阳东升西落的整体,日并不是时间本身,而只是时间尺度,即只是时间性借以非本真地到时或非本真地解释自己的尺度。最简单地说,时间性借日这一尺度这样解释自己:白天是干事的时候,而不是睡大觉的时候。显而易见的是,这里的'白天'并非时间,而只是天体(地球与太阳)运行的一段空间位移。在这一整段位移中,天一直是'白的',是亮的,因而称为日,仅此而已。只是当时间性(此在的存在)借助太阳的升降解释自己,日才成为时间的尺度。在这个意义上说,日作为时间的尺度,实质上也就是时间的标志:日(白天)标志着是做……的时候或不是做……的时候。在这种情况下,时间尺度与时间的生存内容仍有关联。正因为这种关联,时间尺度与时间本身仍是有别的[①]。"而当太阳落山、夜晚降临时月亮的出现会给人们带来微弱的光亮并因此会给人类的夜间作息产生重要影响;由于月亮的盈亏具有比1天更长时间的明显的周期性,因此这种周期性同样被人类用于对时间的计量。比如在我国古代的农历中将月亮每一次盈亏也作为一个计时单位,并将其规定为1个月(约为30天);另外,古人通过对太阳周期性运动规律的长期观察、研究,特别是结合春—夏—秋—冬四季更替的规律发现,除了具有"东升西落"的周期性之外,太阳的运行还存在更长的周期性规律,这一周期大约为365天(后来更为细致的观察发现这一周期应该是365.25天,这就是每4年需要在2月份增加一天的原因),人们将这一周期规定为1年。由于我国自古以来就是一个以农作物生产为主的国家,农作物的收成对农民而言显得异常重要,而农作物的播种、生长及收获具有一定的周期性,特别是一年中的几个关键的节气对农作物的生长发育具有至关重要的影响,为确保获得更多的农作物的收成,人们需要知道农作物最佳的播种及收获的时间,因此我国古人根据一年中冷暖季节的更替又将其划分为4个季节以及24个节气,这4个季节在每一年都是按春—夏—秋—冬的顺序交替的。人类历史上的文明古国都在上述"年"、"季"、"月"、"日"等几个重要的计时单位以及一年中季节的周期性更替规律的基础上建立了各自的历法,用于规范人们的季节性农业生产活动的行为。后来,随着生产力的发展、社会的进步,人类逐渐开始关注劳动生产效率,从而对时间计量精度的要求也逐渐提高,在这种情况下,"日"这种计时单位已经无法满足人类的日常活动的需要,于是比"日"更小的计时单位"小时"就出现了。这里需要特别指出的是,"时"、"分"、"秒"这些更小的计时单位并不是在近代人类文明高度发展时期因为社会实践的需要才出现的,而是早在四千年前就已

① 黄裕生.时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M].南京:江苏人民出版社,2012:131.

经被古巴比伦人所发明，如英国学者克怀格·卡伦德和拉尔夫·埃德尼在其著作中所介绍的："在公元前19世纪，古巴比伦人就已经把每天分成若干个小时，把1小时分成60分钟，再把1分钟分成60秒[①]。"只是由于当时的各种测量技术特别是计时工具比较落后，从而更加精确的计时单位的使用并非完全必要。而17世纪蒸汽机的出现则开启了欧洲工业革命的全新时代，高速行驶的火车按列车时刻表运行、工厂里的工人按轮班制作业等都需要更加精确的作息时间，于是更加微小的计时单位"分"、"秒"的使用就成为必要，而到了20世纪初，由于现代科学技术的高度发展，需要更加精细的计时单位，于是又出现了"毫秒"、"微秒"、"纳秒"、"皮秒"等计时单位。

从上面的讨论可见，为更便利于人类的实践活动，对"年"、"月"、"日"等较大的计时单位的制定都是参照自然界中周期性的规律进行的，但类似于"小时"、"分"、"秒"等更精细的计时单位的具体实现则与特定结构的计时工具(如时钟)密不可分(虽然天文学家经过长期的观察发现通过对星体在天空中的位置的测定也可以用于更加精细的时间测量，甚至普通人也可以通过观察太阳在天空中的位置估计出1天中大概的时间，但这些测量往往会受到各种条件的限制，而且测量精度也不可能很高)，同时，这些计时工具的产生也不是一蹴而就的，而是经历了从无到有、从简单到复杂、从粗糙到精致的漫长历史演变过程，同时各个时期计时工具的制作工艺也充分体现了人类的智慧。我们知道，古代时期人类的生产力水平低，工具制作的方法也落后，因此无法造出精度较高的计时工具，那么古代文明都使用过哪些计时工具又是如何实现对"1天"的更细微地划分的呢？由于阳光照射到地面上的物体后会在地面上留下阴影，而且阴影的长短会因太阳于一天中不同的时间在天空中位置的不同而有规律的改变，古人据此规律发明了最早的、简单方便的计时方法，即根据一根具有固定长度的木杆在阳光下投射到地面上的影子的长短与太阳在天空中的位置对应起来的方法对时间进行测量，简称杆影测时法，据《史记》记载在中国春秋战国时期就使用杆影测时法对时间进行测量。例如，黄裕生教授在其著作中从现象学角度对时间的杆影测量法所作的论述："此在并不一直局限于以'自然钟表'计时，也就是说，时间性并不非得以太阳为'参照系'进行自我解释自我计算。海德格尔在谈到非本真时间(忧烦活动的时间)的到时时，认为此在也可以摆脱自然钟表而利用人工钟表，虽然这种人工钟表要能够执行公共计时，也必须依照自然钟表进行调整。事实上，古人早已摆脱直接根据天体运动解读时间的做法。比如古人利用垂直插在地上的竹竿投下的影子来计算时间：现在是一倍竹竿长的时候，现在是半竹竿长的时候，等等。这种计时法的精致化就是几乎所有民族都使

① ［英］克怀格·卡伦德，［英］拉尔夫·埃德尼．视读时间［M］．张颖，译．合肥：安徽文艺出版社，2007：3．

用过的钟表：日晷。它的发展就是我们今天使用的钟表[①]。"根据杆影的长短实现对时间进行测量的方法所获得的对时间的测量值显然是不均匀的，而且在不同的季节里即使是同一根木杆在一天中的同一时刻投射到地面上的阴影长短也是不同的，为消除这些因素的影响，中国古代东汉时期又发明了圭表这种最早的计时工具，圭表计时技术消除了杆影测时法存在的不足之处，其方法是将一根固定长度的杆子竖在圭表上的固定位置上，而后将不同季节中的每一天的不同时刻阳光照射到杆子上后杆子在圭表上留下的影子标记下来，这些标记就与不同季节中每一天的不同时间对应起来，在需要对时间进行计量时只要在圭表上竖立杆子查看在阳光的照射下圭表上的杆影就可解决问题，这样做基本可以保证在不同的季节以及太阳在天空中的不同位置较精确地测量出一天中不同的时间。到了中国古代西汉时期人们在圭表的基础上又发明了日晷，可以比圭表对时间进行更为精确的测量。但以上几种利用阳光进行测量时间的方法在阴雨天气以及没有阳光的黑夜就完全失去作用，为此在中国西汉时期有出现了漏刻这种计时装置，水从刻有刻度的漏壶中流出后漏壶中的水连续减少，漏壶上的刻度即可对漏壶中水量的减少进行度量，由于漏壶中水量减少的过程都需要时间，这样漏壶上的刻度就可与时间的流逝对应起来从而实现对时间的测量，显然采用漏壶对时间进行测量不会受到天气等因素的印象，可以随时对时间进行测量。但用漏壶测量时间同样存在许多问题，最主要的问题是随着漏壶中的水不断漏出漏壶中的液面不断下降，漏壶中的水漏出的速度会减小，这就使得对时间的测量出现了不均匀性，为此又出现了二级漏壶以及中国古代著名天文学家张衡发明的漏水转浑天仪，特别是漏水转浑天仪可以较精确模拟天空中各个恒星的动态位置，与天象可以较好地吻合，成为当时人类社会精度较高的测量时间的仪器，而后来我国唐朝时期出现的击鼓钟就是在浑天仪的基础上发明的。后来在漏刻的基础上又衍生出沙漏、油灯钟以及香篆钟等以特定物质数量的均匀减少为测量标准的测量时间的工具。

以上介绍的几种测量时间的工具普遍存在体积较大不易携带、测量精度差、线性度差等缺点，特别是这些计时工具都没有采用稳定性好、变化周期小的周期性变化过程对时间进行测量，因此要实现对更精细的时间（分、秒等）进行测量特别是将时间可视化及数字化就会成为非常困难的事情。而对人类全新形式的高精度计时工具的陆续发明具有里程碑意义的事件是伽利略于 1582 年发现的单摆摆动的周期性或等时性，后来出现的体积小巧、携带方便的摆钟就是在此基础上发明的、用单摆的微小的摆动周期为计时单位对时间进行测量的计时工具。自荷兰科学家惠更斯于 1656 年发明人类第一台摆钟后至 20 世纪中叶期间经历的时间约有 300 年

① 黄裕生．时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M]．南京：江苏人民出版社，2012：131—132.

之多，虽然钟的外观及“摆”的形态与最初的摆钟相比有非常大的变化，但“摆”仍然在其中起着关键作用。摆钟具有计时精度高、结构紧凑、便于小型化、携带方便等优点，如法国科学家吉尧姆于19世纪末发明的天文用摆钟对时间的测量则更是达到了1天的误差不超过千分之几秒的精度，正是由于摆钟有诸如此类的优点，使其很快在全世界得到了广泛的普及。而到了20世纪中叶，由电池驱动的计时精度更高的电子表出现了，这种电子表借助在微弱的电流控制下以极高的精度按特定的频率振荡的石英晶体产生的每一个周期性振荡为计时标准对时间进行计量，可以使其对时间的计量达到极高的精度，最高精度可达到一年误差几毫秒的精度，这是与没有误差的、完全理想的周期性振荡现象之间的绝对误差。再后来计时精度更高的原子钟出现了，这种原子钟以特定的原子(通常采用铯原子)为振荡器产生的振荡频率作为计量标准对时间进行精确地计量，计时精度可以达到1千年误差几毫秒以内。在当今世界，人类社会普遍使用着精度极高的计时工具对时间进行高精度的计量，使得人们能够精确地把握并安排、规划时间。

上面我们讨论的时间的可感知性及可测量性都是基于(用实数表示的)“实时间”的概念，而“虚时间”这一概念在现代物理学中同样是一个重要的概念，那么从时间的可感知性及可测量性方面我们应该如何去理解虚时间概念呢？下面我们就英国著名物理学家霍金先生提出的虚时间概念进行简单的讨论。所谓的虚时间是时间 t 与虚数单位 i 的乘积 it，也即虚时间是虚数，我们知道，对虚数而言只有其模才有意义、才真正用于描述现实中的数量关系，而虚数作为数不能直接被我们感知及测量，因此虚时间不具有可感知性及可测量性，而真实的时间直接具有可感知性及可测量性，这也就意味着真实的时间不可能是虚时间而只能是“实时间”。虚时间概念最早出现在狭义相对论的四维时空中，在狭义相对论中虚时间 iCt 作为一个维度与其他三维空间一起构成所谓的四维闵科夫斯基空间，在四维闵科夫斯基空间中如果我们假定四维时空连续区内相邻的两点之间的量 $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - C^2dt^2$ 对于所有惯性系而言都是不变量，那么结合光速不变原理就可以推论出洛伦兹变换及所有狭义相对论的结论。但根据我们前面的讨论可知时间与三维空间不可能构成所谓的四维时空，这也就意味着在狭义及广义相对论中四维时空仅仅只有方法论意义，从而在狭义相对论中的虚时间也仅仅只有方法论意义。在广义相对论中爱因斯坦则将引力场归结为弯曲的四维时空，并在弯曲的四维时空概念的基础上推导出了引力场方程，在通过对引力场方程的求解过程中，科学家发现在满足一定的前提条件下引力场方程存在奇异解，即所谓的一种存在于四维时空中的在无限小的空间范围内聚集了非常大的质量从而其密度为无限大、引力场强度为无限大、时空曲率无限大的天文现象——黑洞。一直以来黑洞是作为经典引力场方程的一个特殊解被科学家所广泛接受的，科学家们普遍认为只要广义相对论是

正确的那么黑洞就必须存在；但霍金认为，由于在黑洞的视界内时空的曲率无限大、引力场强度无限大、空间范围无限小，从而量子效应成为再也无法被忽视的事实而变得非常重要，也就是说在黑洞周围微小的空间范围内必须考虑量子效应，这种情况同样也适用于在大爆炸恰好发生的那一时刻宇宙的时一空结构，也就是说传统理论不再是对宇宙的一种理想的描述方法。所以，人们不得不运用量子引力理论来讨论宇宙的最初阶段。正如霍金先生在其著作中所提到的："在量子理论里，一般的科学定律到处（包括在时间开始时）起作用是可能的，没有必要为奇点假设新定律，因为在量子理论里不需要有任何奇点存在①。"霍金因此认为在黑洞这一奇异天体中量子力学与广义相对论应该能够实现完美的统一。在统一量子力学与广义相对论的方案中，霍金采用了费因曼的路径积分的方法阐述量子力学。"在这种方法里，一个粒子不像它在传统的理论里那样只有一部历史，而是它被假设为在时空中沿每一条可能的路径前进，而且与这些历史中每一部历史联系在一起的是一对数字，一个代表波的大小，另一个代表它在周（它的相）中的位置。粒子穿过某个特定点的概率是通过把与穿过这个特定点的每部可能历史联系在一起的波加起来找到的。然而，当人们真的试图进行这些计算时，他们碰到了一些技术问题。解决这些问题的唯一办法是下面这个特殊的处方：人们必须为了不是在你和我所经历的'实'时里，而是发生在所谓的虚时里的粒子历史，把波加起来②。"另外，借助广义相对论的重要结论我们知道，粒子在由大质量物体引起的弯曲的时空中运动时，其路径也是弯曲的，霍金将这一结论与量子力学中费因曼所提出的方法结合起来提出了虚时间概念："我们相信必定是任何最终理论一部分的第二个特征是，爱因斯坦关于引力场有弯曲时空表示的想法：粒子试图跟随最近的物体来到弯曲空间的一条笔直路径上，但是，由于时空不是平坦的，它们的路径看上去是弯的，好像是被引力场弄弯的。当我们将费因曼的历史总结应用到爱因斯坦关于引力的观点上去时，粒子历史的类似物就是代表整个宇宙史的一个完整的弯曲时空。为了避免在实际运用历史总结时出现的技术困难，这些弯曲时空必须被看做是欧几里得时空，也就是说，时间是虚的，同空间方向难以区分③。"在此，霍金所说的费因曼的历史总结就是路径积分。在霍金看来，由于在量子引力理论中使用了虚时间概念，时间与空间之间的区别消逝了。具体地说，"因为人们在使用欧几里得时空，其中的时间方向同空间方向处于同一基础之上，因此很可能时空范围是有限的，但没有构成边界或边缘的奇点④。"特别是霍金认为奇点的存在是广义相对论的缺陷，

① [英]史蒂芬·霍金. 时间史之谜[M]. 张星岩，刘建华，译. 上海：上海人民出版社，1991：160.
② [英]史蒂芬·霍金. 时间史之谜[M]. 张星岩，刘建华，译. 上海：上海人民出版社，1991：161.
③ [英]史蒂芬·霍金. 时间史之谜[M]. 张星岩，刘建华，译. 上海：上海人民出版社，1991：162.
④ [英]史蒂芬·霍金. 时间史之谜[M]. 张星岩，刘建华，译. 上海：上海人民出版社，1991：163.

广义相对论在奇点处变得没有意义，而量子引力理论也许可以真正消除经典的广义相对论中的奇点问题。奇点定理的真正重要性在于，在奇点上引力场必定变得难以想象得强，以至于量子引力效应无法被忽视。这一点又导致了宇宙在虚时间中可以是有限的，但没有边界或奇点的想法。霍金因此认为："所谓的虚时实际上是实时，而我们所说的实时只是我们想象中虚构的事物。在实时间中，宇宙有一个在奇点的起点和一个在奇点的终点，这两个奇点构成了时空的边界，而科学定律在那儿失去作用。但是，在虚时间中，没有任何奇点或边界。所以，也许我们所说的虚时间实际上是更基本的东西，而我们所称作实时间的只是为了帮助我们描述我们想象中的宇宙模样而创造的一种想法。……所以，提出'实'时间和'虚'时间，哪一种是真实存在的问题是毫无意义的，它仅仅是一个哪一种描述更有用的问题[①]。"通过上面对霍金引进虚时间概念的过程的考察我们可以清楚地看到，霍金在建立其量子引力理论过程中完全是为了解决对粒子或宇宙进行路径积分时存在的困难而引进虚时间概念的，也就是说虚时间概念仅仅只有方法论的意义。而当借助其引入的虚时间概念使得用量子力学理论对引力场中的奇点——黑洞的描述变得更自然、更有意义的情况下，霍金认为虚时间概念可能不再仅仅具有方法论的意义，而是具有现实的意义，即认为虚时间才是真实存在的时间，特别是霍金认为实时间与虚时间哪个更真实的问题都是无意义的。由于虚时间与空间的含义基本等同，这样，霍金的理论所描述的对象将只能是静止的，因为没有用于描述物质的运动、变化过程的实时间参数，因此霍金先生提出的只有虚时间是真实时间的观点显然从根本上否定了物质运动的可能性，这样的理论不可能真实地反映相应的物质变化过程。究其原因，我们认为霍金先生并没有真正搞清一切物质的变化过程的时间性以及时间的含义，并且将只具有方法论意义的概念不加思索地提升至本体论层次，从而最终迷失在了自己虚构的概念世界中。

在前面的章节中我们提到过一切物质的变化过程都具有能够被我们间接感知到的时间性，这种时间性显然是指"实时间"而非"虚时间"，而包括量子力学及相对论在内的物理学理论是描述具有时间性的物质的变化过程的理论，因此物理学必须正视包括小至微观粒子、大至整个宇宙在内的所有物质变化过程都具有时间性这一前提，而霍金先生将虚时间的概念真实化的做法的最终结果显然否定了物质的变化过程的时间性，进而从根本上否定了物质的变化过程本身。我们知道，与采用数学方法直接对物质的变化过程本身进行动力学描述的狭义或广义相对论不同，量子力学从本质来说上是对粒子的各种状态出现的概率及其变化规律进行描述的科学，从而所使用的各种表述方法（包括虚时间概念）仅仅只具有方法论意义

---

① [英]史蒂芬·霍金.时间史之谜[M].张星岩，刘建华，译.上海：上海人民出版社，1991：168.

而不具有实在论意义，霍金先生直接将量子力学中虚时间这一只具有方法论意义的概念移植到对整个宇宙的描述过程中并将其实在化的方法是不可能正确的。这也就是说时间必定是“实的”而不可能是“虚的”，唯有这样时间才能够具有可感知性及可测量性，而且只有这样，物质的变化过程才能具有时间性，真正意义上的物质的变化才是可能的。

2.1.4 时间的客观性、可感知性及可测量性之间的关系

以上我们详细讨论了时间的客观性、可感知性及可测量性。因为我们的知觉系统只能对具有客观性的对象产生感知，而且我们只能对原则上可以感知到的对象进行观察及测量，因此时间的客观性、可感知性及可测量性三者之间必然存在密切的关系，下面我们对三者的关系进行简单的论述。

时间的客观性与可感知性之间的关系。因为时间具有客观性，客观地存在于物质的存在及其变化过程中而非存在于人们的大脑及意识中，从而时间能够借助物质及其变化过程对人的知觉系统产生作用并被间接感知，才使得时间具有可感知性；而由于能够通过物质的变化过程作用于人的知觉系统并最终在人的大脑中产生相应的影像从而具有可感知性，时间的客观性才是真实的而非抽象、虚构的，因为只存在于人类的意识中的抽象、虚构的对象不可能像外在于人类意识的客观存在的对象那样会真实、生动地与我们的感官发生相互作用从而被我们的感官所感知。另外，时间的客观性与可感知性之间还具有相互印证的作用，也就是说其中一个性质的存在可以为另一个性质的存在提供依据。由于我们对物质变化过程的时间性的感知是真实、可信的，即是说时间具有可感知性是我们通过对所有日常经验的积累及精密科学特别是物理学实验的验证获得的确定无疑的结论，这一结论反过来又为时间具有客观性的观念提供了强有力的支持，因此可以说我们对时间的感知是对时间的客观性的印证。而正因为具有客观性，才使得时间不依赖于我们的意志而存在，并通过物质的变化过程间接地作用于我们的感官从而能够被我们所认识及把握。而因为时间具有客观性，所以时间不会因为我们的存在状态而发生任何变化，即使由于我们不在场或者我们处于睡眠状态或者我们得了失忆症或者我们不在这个世界上从而我们无法感知到时间，时间也照样一如既往地起着作用而不会因为我们的感觉而受到任何影响。

时间的可感知性及可测量性之间的关系。人类历史上最早的计时方法是通过对自然现象中规律性事件发生的不断感知、观察而发现的，这种计时方法建立在对自然现象中周期性规律的精确描述的基础上并贯穿于人类社会的各种历法中，因此也可以说早期文明社会的人类对时间的测量是通过对时间的感知实现的，也就是说时间的可感知性是对时间进行进一步测量及研究的前提条件，没有对时间的

感知，那么对时间的测量也将是不可能的，从而时间的可测量性也无法真正体现出来，因此如果没有时间的可感知性，那么也不可能有时间的可测量性。而正是通过对被计时工具量化了的时间的感知和比较，人们可以进一步发现现有计时工具存在的问题，从而能够提出对其进行改进的方法并创造出精度更高的计时工具，而人类借助更先进的计时工具实现地对时间的高精度测量反过来又无可辩驳地证明了时间的可测量性。而采用精确的计时工具及计时单位对时间进行测量的结果使得具有可感知性的时间实现了标准化及精确化，特别是人类借助时钟对时间进行测量的结果使人们对时间的感知更为直观、精确及细腻，并进一步量化、放大了人类对时间的感知及时间的可感知性，使得人们能够借助计时工具去感知远超出人类的感知阈值范围的时间间隔，并借此体验存在时间极其短暂的微观现象，同时，人类在对时间进行长期测量的过程中能够更深刻地感知时间。需要强调说明的是我们对时间的感知其实也是对其进行的测量，只不过是借助我们的生物钟所进行的，对时间感知的过程就是对其进行测量的过程。另外，从本质上来说时间的可感知及时间的可测量是时间具有的某一种性质的两个方面，时间的可感知性是这一性质的质的规定而时间的可测量性则是这一性质的量的规定。而对时间的感知其实也是对时间的一种测量形式，这是人类体内的生物钟对物质变化过程的时间性的自动度量，当然，这种度量还必须借助人的记忆才能形成对时间的完整感知。由于生物钟的周期不能够被人的知觉系统所感知，因此，这种度量不可能是量化的。

时间的客观性与可测量性之间的关系。显然，时间的客观性是时间的可测量性的前提条件，如果没有客观性，那么我们就不可能对时间进行任何形式的测量，而且我们借助时钟所进行的对时间的测量也将变得毫无意义，从而时间就没有所谓的可测量性。而时间具有可测量性则意味着我们能够对其进行测量，这本身就说明我们在测量的对象是具有客观性的，因为假如被测量的对象不具有客观性，那么我们所作的测量将毫无意义。另外，对时间的各种测量则进一步量化了时间的客观性，从而使得时间不仅仅具有自在形式的客观性，并且这种测量在一定意义上使得我们能够借助测量时间的工具——时钟——直观具有量化性质的客观性的时间并为时间的客观性提供佐证。当然，由于时钟的广泛应用使得我们关于时间流动性的观念被更加直观地呈现出来，因此，在量化了时间客观性的同时也更进一步强化了我们关于时间具有流动性的错误观念。

2.2 时间的连续性及均匀性

由于时间与空间的概念是人类所有知识中最基本的概念之一，因此这两个概念的各种性质对人类各种知识的描述会产生深远的影响，除了上面讨论过的时间所具有的性质外，连续性及均匀性也是时间的非常重要的性质。时间的连续性及

均匀性是用于表征时间坐标轴上任何一个时刻到下一时刻之间过渡方式的重要性质,确切地说是时间坐标轴上的点所对应的时间数值集合的结构性质。对于时间到底具有连续性还是具有分立性,自古希腊哲学家在提出时间概念之初开始到今天相关的争论一直没有停止过,而且在争论过程中一些哲学家陆续提出各种同样可以适用于空间的连续性的关于时间连续性的悖论,其中至今仍然具有广泛影响的要数芝诺所提出的几个悖论,这些悖论的提出虽然对时间及空间的连续性的理解造成了巨大的困惑,但坚持时间、空间具有连续性的哲学家们并不会因此而放弃自己的观点,因为那些坚持时间及空间具有分立性的哲学家们同样会遇到无法逾越的障碍。按通常的观点,时间的连续性是关于时间结构的自然、简洁的描述,但有的物理学家却并不满意这种观点,为了从本质上理解微观粒子的粒子性及波动性(通常被称做波粒二象性),特别是为了将广义相对论与量子力学完美地结合起来,一些物理学家提出关于时间、空间为不连续即分立的物理理论并试图通过科学实验加以证明,但这些理论均无法完美地将微观现象与宏观现象结合起来,同时这些理论往往会导致物理上无意义的、无穷大的结果。正因为如此,迄今为止多数科学家仍然坚持时间、空间具有连续性的观念。实际上关于时间及空间的连续性的问题最终都可完全归结为实数的连续性,而数学家们关于实数的连续性的思考以及因此产生出的各种悖论一方面深化了人类对连续性的理解并进而促进了数学的发展,另一方面又造成人类对连续性更大的困惑。但即使这样我们也不可能会轻易放弃时间的连续性概念,因为近代甚至现代物理学理论都建立在时间具有连续性观念的基础上,而正是这样的科学理论为我们理解自然、解释自然界各种现象提供了有力的工具。

2.2.1 时间的连续性

时间的连续性的物质基础是物质的存在及变化过程的持续性或不间断性特征,物质变化过程的这一特性不需要任何原因和理由,反倒是本质上起因于物质间复杂相互作用的物质的存在及变化过程的间断、终止等现象都需要得到解释。因为本质上而言,任何存在着的物质状态的变化都有其原因,而由于物质某一状态的终止也是一种变化、是一种特殊的变化,因此必然也有其原因,这些原因最终都可归结为物理学研究所发现的四种相互作用力,归结为力的及能量的守恒、归结为能量及物质的不灭,特别是由相互作用导致的物质的存在状态的变化从产生直到终止都必然表现为一种物质形态的消失及另一种物质形态的出现,这显然是另外一种形式的持续性。正因为如此,从所有本质上具有持续性特征的物质的存在及变化过程中抽离出来的时间必须具有连续性。实际上,在我们将时间概念从物质的存在及变化过程中抽象出来的同时,连续性也一同被抽离了出来并将其赋予时间

从而确保了时间概念的纯粹性及简单性，因而体现了时间概念的最少约束、最大概括性的特点，而所谓的不连续性或间断性等多样性特征则仍然属于物质的变化过程。唯有如此，时间概念才能成为最具一般性的概念，才能成为用于描述一切物质变化过程的基准，并因此既可用于具有连续性特征的变化过程，也可用于具有间断性特征的变化过程。而为了一以贯之地将时间概念用于任何可能的物质变化过程，就必须保持时间的意义及各种性质的不变性，其中就包括时间的连续性。可见，时间的连续性同时也是奥卡姆剃刀以及逻辑学中的同一律对时间概念的要求。

在人类历史上最早提出时间的连续性概念的是古希腊伟大的哲学家亚里士多德。对于运动的连续性亚里士多德是这样定义的："如果事物的运动过程里没有中断或者只有最小的中断，那么该事物就是在"连续地"运动着——我所说的中断不是指时间上的中断(时间上的中断并不妨碍连续，相反，在低音之后可以直接发出高音)，而是指运动内容的中断[1]。"而对于时间的连续性，亚里士多德在其著作中也进行了详细说明："既然任何一个运动都发生在时间里，并且，在任何一段时间里都能有运动，又，任何一个运动者的事物都既能运动得快些也能运动得慢些，又，在任何一段时间里都既能有较快的运动也能有较慢的运动，既然如此，那么必然时间也是连续的。我所说的连续的事物是指可以分成永远可再分的部分的事物；正是根据关于连续事物的这个定义才说时间必然是连续的[2]。"显然，亚里士多德关于运动的连续性及时间的连续性的论述都是凭借日常语言而不是数学语言进行的，所作出的定义完全是直觉意义上的而不是科学的，这样的定义显然无法直接用于科学的推理过程。虽然如此，但在亚里士多德关于连续性的定义仍然有合理的成分，特别是将连续性看做永远可以不断分割的观点就与微积分学中关于实数的连续性定义的内容基本一致，并且成为后人思考及解决连续性问题的出发点。在牛顿和莱布尼兹的微积分学诞生以后，新的数学学科对问题的解决带来了神奇的效果，特别是按微积分的方法对相关的数学问题所进行的分析往往都能够给出完全正确的答案，但当时微积分对数学问题极不严格的处理方法又给数学家们造成了极大的困惑，为了更好地理解微积分中的基本方法，法国数学家柯西(1789—1857)及德国数学家外尔斯特拉斯(1815—1897)以实数的连续性(简单地说即与实数对应的点无间隙地布满整个数轴)为基础分别建立了严格意义上的极限理论，从而为微积分学打下了坚实的基础，之后的科学家甚至哲学家在思考连续性问题时都是基于实数的连续性概念。如叔本华在考虑时间的连续性问题时就将其归结为实数的连续性，以下是吴国盛教授转引叔本华关于时间的连续性的观点，叔本华认为：

① [古希腊]亚里士多德.物理学[M].张竹明，译.北京：商务印书馆出版，1997：147.
② [古希腊]亚里士多德.物理学[M].张竹明，译.北京：商务印书馆出版，1997：167.

"时间是均匀的连续统,它的任何一部分都与其他部分没有差别,任何非时间的东西都不可能将部分时间与时间的连续统分开[①]。"这就意味着我们在考虑时间的连续性问题时必须将时间概念中的时刻看做是实数,从而将时间的连续性归结为实数的连续性,只有这样,才能很好地理解和解决关于时间的连续性问题。

在当今自然科学特别是物理学中,关于运动及时间的连续性的定义完全是凭借数学中关于实数的连续性的定义进行的:时间的连续性(或不间断性)是指在时间坐标轴上与时间的每一时刻相对应的所有点是紧密地、不间断地分布着;由于我们可以在思想实验中将任何一段时间间隔采取无穷尽的步骤分割成任意小的部分,从而可以说时间是时刻(或瞬间)的连续统。另外对于时间坐标轴我们还可以用戴德金分割对其上的任一时刻进行分割,所得到的分割同样可以证明时间坐标轴上点的分布的连续性。我们知道,物理学中一般用一条规定了时间的原点、正方向及单位时间的无限长的带方向的直线来描述时间或时刻,同时将这条带方向的直线称做时间坐标轴,时间坐标轴的正方向表示时间从小到大或者从过去到未来流逝的方向,在时间坐标轴上可以用"秒"、"分"、"时"等作为时间的单位,时间坐标轴上的每一个点都表示一个时刻 t,时间坐标轴上的任意两个时刻(如 t_1、t_2)之间的间隔表示时间间隔 $\Delta t(=t_2-t_1)$,时间坐标轴的特殊时刻-原点 O 表示人为规定的时间的参考点,常常用某一特殊事件来表示,如现代人类社会采用公元纪年对历史年代进行的描述就是使用耶稣基督诞生的年代作为公元元年(即原点);为方便起见同时也为避免引起不必要的争论,时间坐标轴上时刻的合理自然的取值范围是从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 的所有实数,这样的取值范围不需要作任何特殊的假设,这一定义意味着在物理学中经常采用的时间坐标轴上的所有点(即时刻)具有连续性。时间作为任何一个描述物质的变化过程的物理量共同的自变量其具有连续性这一点在经典力学中是显然的,而在相对论中时间虽然已经不再作为一个独立的维度起作用,但它却与三维空间一起构成连续的四维流形,从而作为四维流形的组成部分的时间必须具有连续性,这一点在经典力学中的伽利略变换、狭义相对论中的洛伦兹变换及一切含有时间参数的物理方程特别是物理学微分方程中是显而易见的,而由于经典力学、相对论及量子力学都被现有的实验证明为正确的,从而也都间接地证明了时间具有连续性,因此,可以说至少到目前为止几乎所有物理学理论都是建立在具有连续性的时间的概念基础上的。需要加以说明的是,时间的连续性显然不同于空间的连续性,空间的连续性是具有可视性的连续性,这是构成空间的、原则上能够作为一个整体同时呈现在我们眼前的所有的点具有的性质。而时间的连续性则是一种看不见、摸不着的连续性,这种连续性必须转化为空间形式的

① 吴国盛.时间的观念[M].北京:中国社会科学出版社,1996:163.

连续性后才能被我们所理解、把握及研究,时间的这种特殊性质的连续性被法国哲学家亨利·柏格森称之为绵延。柏格森认为,我们是通过将时间空间化来理解绵延的:"我们让时间处于空间中,用有关广度的字眼来表示绵延,因而连续就呈现为一根连绵不断的线条或链条的样子,其各个部分彼此接触又不互相渗透。请注意,这样构成的这种心理影像意味着:我们对于先与后,已经不是连续加以知觉,而是同时加以直觉。同时也意味着:我们如果假定一种连续一方面仅仅是一种连续,而另一方面却又包含在整体和同一瞬间中,那么这就是一种矛盾。当我们谈论绵延中连续的次序以及这种次序的可逆性时,就像我们方才所界定的那样,我们所涉及的连续是纯粹的连续,没有任何空间性掺杂在内,或者是在空间中显现着的连续,它的呈现方式使我们立刻就能领会到许多彼此有别而又并置的元素[①]。"显然,柏格森用绵延这一概念来表征时间的连续性是以时间具有流动性这一观念为前提的,即认为时间不断地从过去流向现在再流向未来,而我们下面将要进行的论述完全否定了时间的流动性观念,这也就意味着柏格森所说的绵延只能指物质变化过程的连续性。

我们知道,所有直觉的推理只能适用于有限性问题,从而当直觉的推理应用于无限性问题时就会导致似是而非的结论甚至是悖论。对任何涉及连续性的问题所进行的逻辑的、数学的分析最终都可能导致无限性概念,而对于时间连续性的直觉分析同样如此,如古希腊哲学家芝诺提出的著名的阿基里斯悖论就是在对阿基里斯追赶乌龟的过程所需要的时间的分析中产生的。实际上,芝诺通过对阿基里斯追赶乌龟的全过程的分析构造了一个无限的时间序列,而正是这一无限的时间序列隐含了时间的连续性这一前提,但芝诺却企图仅仅借助于直觉来把握无限的时间序列,而这正是导致悖论产生的根源。芝诺的阿基里斯悖论的内容是:古希腊有一位名叫阿基里斯的飞毛腿,他要追赶已经在他前面爬行了一段路程的一只乌龟,阿基里斯的奔跑速度显然比乌龟的爬行速度要快得多,经验告诉我们阿基里斯最终必定能够追赶上乌龟,但直觉的分析似乎并非如此。在追赶乌龟过程中当他跑到乌龟最早开始爬行的位置时乌龟又向前爬行了一段路程,于是阿基里斯要追赶到乌龟则必须跑过乌龟后来爬行的那段路程,在此期间乌龟又往前爬行了一段路程,如此循环往复以至无穷。可见阿基里斯在奔跑过程中虽然与乌龟之间的距离越来越短,但却永远无法追赶上乌龟。芝诺由此得出结论:由于奔跑速度快的阿基里斯永远追赶不到运动慢的乌龟,因此运动是不可能的。芝诺通过对阿基里斯追赶乌龟过程的分析所获得的结论显然与我们的经验常识相矛盾。因为根据我们的经验、特别是根据物体的运动方程,运动速度快的物体最终总是能够赶上运动速度

---

① [法]亨利·柏格森.时间与自由意志[M].冯怀信,译.合肥:安徽人民出版社,2013:82.

慢的物体。假定在起始时刻 $t_0=0$ 时阿基里斯与乌龟之间的距离是 L，阿基里斯的匀速奔跑的速度 V_1 是乌龟匀速爬行的速度 V 的 $n(n>1)$ 倍，这样，根据简单的运动方程可以得到阿基里斯追赶上乌龟所需要的时间是：

$$t_1=\frac{L}{(V_1-V)}=\frac{L}{(n-1)V}$$

从而可以得到在 $t=0+t_1=t_1$ 时刻阿基里斯追赶上乌龟的结论。另外，如果我们假定阿基里斯在追赶乌龟的过程中两者之间的距离是 S，那么随着时间 t 的不断增大阿基里斯与乌龟之间的距离 S 处于不断减小过程中，S 与 t 之间具有一一对应的关系，具体关系是：

$$S=L-(n-1)Vt$$

即 S 是时间 t 的一次函数。从函数图像上可见，阿基里斯与乌龟两者之间的距离均匀减小并最终赶上乌龟，并非如芝诺的分析所说的，虽然阿基里斯与乌龟之间的距离越来越小但阿基里斯却永远无法追赶上乌龟。显然，当 $t=\frac{L}{(n-1)V}$ 时 $S=0$，即经过时间 $t=\frac{L}{(n-1)V}$ 后阿基里斯最终必然能够追赶上乌龟，也就是说运动永远在进行着而全然不去理会我们对运动所进行的任何分析。既然我们的经验以及简单的数学计算告诉我们阿基里斯最终必定能追赶上乌龟，那么芝诺的阿基里斯悖论究竟是如何产生的呢？自从芝诺提出阿基里斯悖论至今，已有许多逻辑学家及哲学家对阿基里斯悖论进行了广泛深入的研究，并获得了一些有意义的结论，但在相应的分析过程中也产生了新的问题，实际上，直到今天阿基里斯悖论仍然没有得到彻底地解决。那么，阿基里斯悖论真的是难以解决的吗？人们在解决这一悖论过程中到底什么方面出了问题？下面我们借助数学分析中的数列及极限的概念对芝诺提出的阿基里斯追赶乌龟过程的直觉推理过程进行详细的分析，希望能够找到解决这一悖论的思路、方法。

假定在初始时刻 $t=0$ 时阿基里斯在位置 A_0 处，乌龟在位置 A_1 处，A_0 与 A_1 之间相距 L 米，即乌龟与阿基里斯之间相距 L 的路程，并且阿基里斯匀速奔跑的速度是乌龟匀速爬行速度 V 的 $n(n>1)$ 倍，即阿基里斯奔跑的速度比乌龟爬行的速度快。这样，阿基里斯从其初始位置 A_0 开始到达乌龟的初始位置 A_1 处所需要的时间是 $\frac{L}{nV}$，而在这段 $\Delta t_1=\frac{L}{nV}$ 的时间里乌龟又向前爬行了一段路程 $\frac{L}{n}$ 到了位置 A_2 处，这时乌龟与阿基里斯之间相距 $\frac{L}{n}$ 的路程；而当阿基里斯再从位置 A_1 到达位置 A_2 处所需要的时间是 $\frac{L}{n^2V}$，在这段 $\Delta t_2=\frac{L}{n^2V}$ 的时间里乌龟又向前爬行了一段路

程$\frac{L}{n^2}$到了位置 A_3 处，这时乌龟与阿基里斯之间相距$\frac{L}{n^2}$的路程……以此类推，阿基里斯从位置 A_{k-1} 到达位置 A_k 处所需要的时间是$\frac{L}{n^k V}$，而在这段 $\Delta t_k=\frac{L}{n^k V}$的时间里乌龟又向前爬行了一段路程$\frac{L}{n^k}$到了位置 A_{k+1} 处，这时乌龟与阿基里斯之间相距$\frac{L}{n^k}$的路程……；由于在每一个类似的过程中乌龟爬过的路程越来越短，阿基里斯与乌龟之间的距离越来越小，从而阿基里斯需要跑过的相应的路程也会越来越短。以上各位置 A_1、A_2、A_2、…、A_{k-1}、A_k、…之间的距离显然构成一个递减序列，而如果我们令这一序列的项数 $k\to\infty$，那么阿基里斯与乌龟之间的距离就趋近于无穷小。显然，数学分析中极限的概念隐含了连续性这一前提。而如果假定阿基里斯开始追赶乌龟的初始时刻是 $t=0$，就可以得到一个阿基里斯追赶乌龟的过程中从 A_0 到 A_1、A_1 到 A_2、A_2 到 A_3、…、A_{k-1} 到 A_k 等等路段所需要的时间构成的无穷的时间序列：

$$\frac{L}{nV},\frac{L}{n^2V},\frac{L}{n^3V},\cdots,\frac{L}{n^{k-1}V},\frac{L}{n^kV}\cdots$$

显然，该无穷的时间序列构成一个在阿基里斯追赶乌龟过程中经过的一系列特殊位置所需要时间的单调递减的无穷序列。由此可以得到一个与阿基里斯在追赶乌龟过程中从 A_0 开始分别到达 A_1、A_2、…、A_{k-1}、A_k、…等特殊位置相对应的一个无穷的时刻的序列：

$$0,0+\frac{L}{nV},0+\frac{L}{nV}+\frac{L}{n^2V},0+\frac{L}{nV}+\frac{L}{n^2V}+\frac{L}{n^3V},\cdots,0+\frac{L}{nV}+\frac{L}{n^2V}+\frac{L}{n^3V}+\cdots+\frac{L}{n^{k-1}V},$$
$$0+\frac{L}{nV}+\frac{L}{n^2V}+\frac{L}{n^3V}+\cdots+\frac{L}{n^kV},\cdots$$

该时刻序列显然与阿基里斯分别到达 A_0、A_1、A_2、A_3、…、A_{k-1}、A_k…每一个位置的时刻相对应并且与下列无穷序列：

$$0,\frac{L}{(n-1)V}(1-\frac{1}{n}),\frac{L}{(n-1)V}(1-\frac{1}{n^2}),\cdots,\frac{L}{(n-1)V}(1-\frac{1}{n^{k-1}}),\frac{L}{(n-1)V}(1-\frac{1}{n^k})\cdots$$

完全等效。该序列是单调递增的无穷序列并且显然有：

$$0<\frac{L}{(n-1)V}(1-\frac{1}{n})<\frac{L}{(n-1)V}(1-\frac{1}{n^2})<\cdots<\frac{L}{(n-1)V}(1-\frac{1}{n^{k-1}})<$$
$$\frac{L}{(n-1)V}(1-\frac{1}{n^k})<\cdots<\frac{L}{(n-1)V}$$

即是说阿基里斯到达 A_1、A_2、A_3、…、A_{k-1}、A_k…这一无穷的位置序列中的任何一个位置的时刻都小于$\frac{L}{(n-1)V}$，从而当 $k\to\infty$ 时该无限的时刻序列的极限时刻

值是：

$$t=\lim_{k\to\infty}\frac{L}{(n-1)V}(1-\frac{1}{n^k})=\frac{L}{(n-1)V}$$

与上述无穷的时刻序列相对应，在追赶过程中，阿基里斯不断接近乌龟过程中与乌龟之间的距离也构成一个无穷序列：

$$L,\frac{L}{n},\frac{L}{n^2},\cdots,\frac{L}{n^{k-1}},\frac{L}{n^k}\cdots$$

该序列显然是一无穷递减的序列。需要特别指出的是，这里的分析中显然隐含了时间的连续性这一前提，正因为时间具有连续性，所以才会产生这样一个无限的时刻序列。这也就意味着阿基里斯要追赶上在他前面爬行的乌龟，似乎必须经历这一无穷的时刻序列(实际上这一序列只存在于人的意识中)。并且在这一极限时刻阿基里斯与乌龟之间相距的路程的极限值是：

$$\lim_{k\to\infty}\frac{L}{n^k}=0$$

由此可见，这一静态的、无限递增的时刻序列完全存在于在阿基里斯从起始时刻 $t=0$ 时与乌龟相距 L 的距离开始，到最终赶上乌龟的时刻 $t=\frac{L}{(n-1)V}$ 这一时间间隔中。可见，虽然该时刻序列的项数是无限的，但最终的时刻却是有限值 $\frac{L}{(n-1)V}$，而且这种情况下乌龟与阿基里斯之间的距离也会达到其极限值 0。这就意味着阿基里斯必定能够在有限的时间 $t=\frac{L}{(n-1)V}$ 内追赶上乌龟，而不是如芝诺凭直觉的推理所得到的——阿基里斯永远无法在有限的时间里追赶上乌龟的结论。

需要特别说明的是，在追赶乌龟过程中，阿基里斯与乌龟之间的距离是均匀减小的，即阿基里斯匀速地通过路程中的所有点(包括上述那些 A_0、A_1、A_2、…、A_{k-1}、A_k特殊的点在内)直至两者之间的距离最终为 0，而非如芝诺分析所指出的两者之间的距离只能在无限地接近却永远无法为 0。显然，位置 A_0、A_1、A_2、…、A_{k-1}、A_k等所在之处的点可以看做对阿基里斯追赶乌龟这段路程的一种无限的分割方式，由于 A_0、A_1、A_2、…、A_{k-1}、A_k 这些静态点的分布是不均匀的，随着 k 值的增大，这些相邻的点之间相距越来越近，直至它们之间的距离趋近于 0，从而阿基里斯在追赶乌龟的过程中，通过这些点所构成的无穷数量的路段所需要的时间也越来越短。数学分析的知识告诉我们，对于无穷多个路段而言，它们的和并不一定是无穷大，而由于这些特殊的点构成的路段的长度迅速地减小并最终趋近于零，从而使得这些路段的长度之和是有限值，完全可以确保阿基里斯最终追上乌龟。实

际上我们可以对任何一段有限的路段在我们的意识中进行任意形式的无限分割，而这些分割只存在于人的头脑中，从而不会对物体的实际运动产生任何影响，因为运动的物体无法“感知”到或“分辨”出我们在知觉中对物体运动路径上的任何形式的分割，也就是说在芝诺的阿基里斯悖论中描述阿基里斯追赶乌龟的无限的序列对应的追赶过程只存在于我们的想象中，从而运动的物体全然不理会我们对其所在路段所进行的任何形式的分割，永远按自然界所规定的同一个法则(例如对匀速运动的情况而言是同一速度)通过这一路段上的所有点或所有线段，也即这一序列的存在并不意味着不断“流逝”的时间可以无限的趋近于却永远不会到达时刻 $t=\frac{L}{(n-1)V}$，时间本身并不需要经历这样一个无穷的时刻序列，事实上时间在均匀地“流逝”，“流过”上述追赶过程对应的时刻序列；由于这一时刻序列只是“静止的”存在于$\left[0,\frac{L}{(n-1)V}\right]$这一时刻区间中，而且该序列最终无限地趋近于时刻 $t=\frac{L}{(n-1)V}$，要多近就有多近，从而证明了时间在时刻 $t=\frac{L}{(n-1)V}$具有连续性，而不是如芝诺所说是证明了运动的不可能性。

以上是与芝诺关于阿基里斯追赶乌龟过程的直觉分析完全等效的数学的精确表述及相应的分析，显然，这种精确的表述及分析如果仅仅依靠我们的直觉是完全无法进行的。因为凭借直觉，我们对阿基里斯追赶乌龟的每一个过程所进行的描述及分析获得的只能粗略的、模糊的而非精确、详尽的结果，特别是由于分析过程中所有细节的、量化的内容都会被我们的直觉完全忽略或者我们的直觉根本无法把握，因此直觉的表述及分析不可能完全正确地反映阿基里斯追赶乌龟整个过程的真实情况，从而这种表述及分析与事实不可能真正相符，这才是导致悖论产生的真正原因。显然，上述精确的、数学的分析结果并没有导致而是彻底消除了所谓的阿基里斯悖论，这说明芝诺对所谓阿基里斯悖论的直觉分析是有问题的，我们认为问题的根源在于直觉在相应的分析过程中的模糊性及对无限过程的无奈：由于空间与时间都具有连续性，因此在上述分析过程中必然会产生阿基里斯需要不断追赶乌龟的无限的路段序列及与之相对应的无限的时间序列，但由于芝诺没有将阿基里斯不断追赶乌龟的每一个过程所需要的时间(从而阿基里斯与乌龟之间相处的特定位置所对应的时刻)用数学语言定量地表达出来，而是将直觉地判断用于对这一无限过程的分析，如果人们仅仅借助直觉要实现对这一无限的追赶过程的分析，就必须对无限序列中的每一个任意小的精细过程都加以关注，但任何人仅凭直觉在有限的时间内根本无法完成这种无限的关注，而只有数学的分析才能够帮助我们在有限的时间中正确地结束这种无限的关注。同时由于根据当时人类掌握的数学知识，芝诺显然并不知道有一些无限的序列之和同样可以是一个有限值，从而

将并不等于无穷大的无限数量的线段序列之和默认为无穷大,从而迷失、沉沦在无限的序列里,并由此推论出完成这一过程必定需要无限的时间这一似是而非的结论。实际上,单凭人的直觉,在有限的时间里根本无法穷尽这一无限的线段序列,更难以理解这一无限的过程竟然可以在有限的时间内完成,而当我们试图借助直觉去把握这一无限的过程时,必将被迫陷入无限的漩涡,纠结于只存在于人的想象中的、永远无法穷尽的追赶过程之中,任其摆布而无法自拔,最终使我们在直觉上产生阿基里斯需要经历一个无限的、无法逾越的运动过程才能追赶上乌龟的幻觉,并因此导致了对运动现象的否定,这就是芝诺通过定性而非定量的分析,最终得出运动是不可能发生的这一悖论的根本原因。由于直觉无法穷尽任何一个无限的过程并最终精确把握描述该过程对应的无限序列及其极限值,因此,要彻底解决阿基里斯悖论从而真正理解无限的过程,不能仅仅依靠我们的直觉及哲学的思辨,只能而且必须借助数学的分析。因为只有定量、精确的数学分析的语言,才能够帮助我们从无限中发现所蕴含的有限并从无限的漩涡中挣脱出来,最终使我们回归到有限之中,回归到正确的方向上,来从而获得正确的结论。

另一个由时间的连续性导致的悖论是著名的汤姆逊灯悖论,这是由美国哲学家J.汤姆逊于1954年首先提出的一个仅仅在逻辑上可行而且只能在我们的思想中进行而无法借助任何物质的实验装置实现的理想实验:实验中有一盏由复杂的定时器程序控制的灯泡,在起始时刻灯泡是点亮的,灯泡持续点亮60秒后定时器把灯泡熄灭,灯泡持续熄灭30秒后定时器又把灯泡点亮,灯泡持续点亮15秒后定时器又把灯泡熄灭,灯泡持续熄灭7.5秒后定时器又把灯泡点亮……即在灯泡持续点亮(或熄灭)k秒后定时器接着又把灯泡熄灭(或点亮)$k/2$秒,灯泡一直被以这种方式点亮或熄灭以致无穷,假定在以上过程中灯泡与开关都是完全理想化、不受任何物理规律的限制的装置,灯泡由点亮到熄灭及由熄灭到点亮状态的转换不需要任何时间,而且灯泡可以在瞬间被点亮并且也可以在瞬间被熄灭。那么,在120秒钟结束时①灯泡一共被点亮、熄灭了多少次?②灯泡在这一时刻是点亮的还是熄灭的?

对于问题①,如果我们把这一灯泡点亮、熄灭的时间序列列出来,则这一序列将是:(点亮)60秒,(熄灭)30秒,(点亮)15秒,(熄灭)7.5秒,(点亮)3.75秒,(熄灭)1.85秒,……,显然这个时间序列是无限递减的序列。因此,当120秒结束时这盏灯泡被点亮、熄灭了无数次。

对于问题②,凭我们的直觉在120秒结束时灯泡显然不是点亮的就是熄灭的。但是在这一时刻这盏灯泡似乎不可能是点亮的,因为灯泡每每被点亮一段时间后紧接着就会被熄灭一段时间,所以点亮不是灯泡的最终状态;同样的,灯泡也不可能是熄灭的,因为灯泡被熄灭一段时间后紧接着就会被点亮一段时间,所以熄灭也

不可能是灯泡的最终状态。由此可见，在120秒结束时灯泡既不可能是被点亮的，也不可能是被熄灭的，或者也可以说在120秒结束时灯泡既是被点亮的同时又是被熄灭的。这一结论显然与我们的经验常识是相矛盾的，这就是这一问题的结论被称为悖论的根本原因，这个例子再一次有力地说明，对于无限的、特别是连续性问题如果仅仅依靠我们的直觉以及经验是不可能完全把握的，必须依靠精确的数学分析才能够获得正确的结论。值得注意的是，这一时间序列之和并非精确地等于120秒，确切地说，这一序列之和的极限值等于120秒，即有：

$$\lim(60+30+15+7.5+3.75+1.85+\cdots)=\lim_{k\to\infty}60(1+\frac{1}{2^1}+\frac{1}{2^2}+\frac{1}{2^3}+\cdots+\frac{1}{2^k})$$
$$=\lim_{k\to\infty}60(2-\frac{1}{2^k})=120$$

也即120秒恰好结束的那一时刻并不属于灯泡被点亮、熄灭的时间序列，因此，没有任何根据能使我们作出120秒结束时的那一时刻灯泡的确切状态的判断，从而我们根本无法预测120秒刚刚结束时的那一瞬间灯泡的确切状态。现在，我们将上述的灯泡点亮、熄灭的时间序列转换为灯泡点亮、熄灭的时刻序列，即在时刻0秒灯泡是被点亮的，而到了60秒这一时刻灯泡被熄灭，在90秒这一时刻灯泡又被点亮，在105秒这一时刻灯泡被熄灭……显然灯泡被点亮、熄灭的时刻序列是：

$$0,60,60(1+\frac{1}{2^1}),60(1+\frac{1}{2^1}+\frac{1}{2^2}),60(1+\frac{1}{2^1}+\frac{1}{2^2}+\frac{1}{2^3}),\cdots 60(1+\frac{1}{2^1}+\frac{1}{2^2}+\frac{1}{2^3}+\cdots+\frac{1}{2^k})$$

这一序列还可以等效地表达为：

$$0,60(2-\frac{1}{2^0}),60(2-\frac{1}{2^1}),60(2-\frac{1}{2^2}),\cdots,60(2-\frac{1}{2^k})\cdots$$

显然，这一时刻序列是单调递增的无限序列，也即有关系：

$$0<60(2-\frac{1}{2^0})<60(2-\frac{1}{2^1})<60(2-\frac{1}{2^2})<\cdots<60(2-\frac{1}{2^k})<\cdots<120$$

由于$\lim_{k\to\infty}60(2-\frac{1}{2^k})=120$，从而这一时刻序列的极限值是120秒，即随着时间的增大，灯泡被点亮或熄灭的时刻逐渐趋近于120秒，而在$k\to\infty$的过程中，这一时刻序列与120秒这一时刻要多近就有多近，直至最终趋近于120秒，因此，正是由于时间在120秒这一时刻具有连续性，从而导致我们无法预测120秒刚刚结束时的那一瞬间灯泡的确切状态，从而这一状况产生的根本原因是时间具有连续性。

由于对时间的连续性的直觉分析，导致了上述的以及其他一些相关的悖论，为了从根本上消除这些因直觉的推理导致的悖论，从而使得我们能够在直觉上理解相应的结论，有些学者提出时间不具有连续性的观点，即认为时间并不是无限可分

的，而是有一个无法再进一步进行分割的最小单元，如果假定存在这样一个时间的最小单元，则上面所述的关于时间的悖论以及其他一些相关的时间悖论就可以迎刃而解。其实早在古希腊时期，哲学家德谟克利特就提出过所谓原子论的构想，即认为一切事物包括空间及时间都不是可以无限分割的，都有一个无法继续分割的最小单元，以此来消除包括阿基里斯悖论在内的各种相关悖论中存在的似是而非的矛盾，但由于德谟克利特的原子论观念在近代科学出现之前仅仅限于哲学思辩，因此没有引起更多的关注。而在18世纪英国科学家道尔顿提出原子论的学说后德谟克利特的原子论重新受到了科学界的重视，特别是相对论量子力学理论体系建立以后为了理解微观物质奇特的量子特性，有的科学家根据对微观现象测量过程中空间坐标存在的精度限制（即 $\Delta x_{\min}=\frac{h}{mC}$）及由此推论出的时间测量方面的限制（即 $\Delta t_{\min}=\frac{h}{mC^2}$）提出分立空间及分立时间的假说。前苏联哲学家 A. M. 莫斯杰巴宁柯在其著作中就对这些学说进行了简单介绍：

“早在1930年，B. A. 阿姆巴楚米杨和 Д. Д. 伊凡宁柯就提出了分立空间的模型，在这种模型中空间和时间的坐标只能取整数值。在这里，空间—时间被看成立方格。

加拿大物理学家斯那德利用了与测不准原理的类比，对空间的量子化提出了另外一种解释。在他的假说中，基本粒子不同时具有三个空间坐标，在某一时刻只能精确地测量粒子的三个坐标中的一个，例如坐标 x，而坐标 y 和 z 仍然是不确定的。

Я. И. 弗仑科尔提出在光锥上空间—时间具有分立性的思想，引起了人们很大的兴趣。按照这种思想，以光速进行（即局限在光锥上的）统一的基本过程是世界上一切过程的基础。这一过程在于：基本粒子在空间一点上消失和在另一点上的某种延迟出现，而这种延迟等于光信号在两点间的距离上传播的时间。世界上一切更慢的运动都产生于这些基本过程的某种‘平均’过程中①。”

但是，微观领域分立时—空的假说由于一方面无法协调分立的微观几何与连续的宏观几何之间的矛盾，另一方面会导致时—空的维数等于零的荒谬结论，当然还会产生其他的一些有悖于人类经验常识的结论，从而这些假说遭遇了严重的困难，更为重要的是现代物理学的各种实验都没有为这些假说提供任何线索，这种情况正如英国物理学家保罗·戴维斯所说：“已经有人提出包含‘时间子’的理论——原子时间（其中最著名的是由戴维·芬克尔斯坦提出的），但是这些理论都没有取

① ［苏］A. M. 莫斯杰巴宁柯. 宏观世界、巨大世界和微观世界的空间和时间［M］. 王鹏令，陈道馥，译. 北京：中国社会科学出版社，1985：146—147.

得成功。在实验的前沿，物理学家常规研究的事件序列的时间尺度大约是一百万亿万亿分之一秒(1×10^{-26}秒)，但还是没有任何关于时间不连续性的线索露出[①]。”其实，最重要的原因在于，这些科学家在提出量子化空间及量子化时间时，对所依据的海森堡不确定关系特别是关于时间的不确定关系的意义的理解是完全错误的，从而时间的不确定关系与量子化的时间之间没有任何关联，正如我们在第1章1.3节中的分析得到的结论，海森堡的(时间)不确定关系说明物质完成其变化过程所需要的时间具有不确定性，即仅仅说明了物质在完成其变化过程中存在的关系，而与时间本身的性质没有任何关系，从而将这种关系推广到时间本身所具有的性质肯定是错误的。可见，目前还没有任何根据能够说明量子化空间及时间的假说，是朝着正确的方向所迈出的有意义的一步；另外我们知道，由于时间并非实体性的存在物，而是物质变化过程的基本性质，同时由于时间的连续性根源于物质变化过程的持续性，根源于物质的不灭及力的守恒，有其坚实的物质基础，而且任何物质变化过程间断性都是其连续性的特殊变现形式，可见，量子化的时间的存在根本没有其物理依据，因此时间本身没有也不可能有任何基本的结构(如量子化结构)。退一步说，即使是微观物质的变化过程中存在时间间隔具有量子化特征的现象，这种特征也只能属于物质的变化过程所具有的性质，而不能不假思索地将其归咎于时间，时间作为一个衡量任何物质的存在及变化过程的基准必须保持其连续性。从而连续性必须被认为是时间的最重要的性质之一而被广泛地应用于一切科学及哲学的理论研究过程中。

2.2.2 时间的均匀性

除了时间的连续性之外，时间的均匀性同样是时间的一个非常重要的性质，由于时间是实现对所有物质变化过程的科学描述的最基本的参数，而且对任何物质变化过程的描述都是以时间参数为标准进行的，因此可以说所有物理学理论特别是物理学方程的表述都必须建立在时间的均匀性概念的基础之上，如能量守恒定律即是时间均匀性的具体体现。而如果假定时间具有不均匀性(如按复杂的规律变化或变化没有规律性)，那么所有描述物质变化过程的物理学方程的表达形式将完全不同，甚至会变得异常复杂乃至无法建立。众所周知，自然界原本就具有严格的秩序及规律，因此，时间的均匀性假设对描述物质的变化过程的规律性具有至关重要的意义，而只有建立在时间的均匀性假设基础之上的物理学以及物理方程才具有最简单、自然的表达形式。由于作为时间的性质之一的时间的均匀性是如此重要，因此我们有必要对其进行简单的讨论。

---

① [英]保罗·戴维斯．关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M]．崔存明，译．长春：吉林人民出版社，2002：254．

我们知道，在所有数学分析教材中，对函数进行定义时其自变量都被默认为在数轴上是均匀分布的，即在自变量坐标轴上的任何一点所对应的数值都是使用完全相同的测量单位进行标注而得到的，从而能够确保函数相对于均匀分布的自变量按相应的函数关系取值并能够真实地反映函数与其自变量之间的关系。自变量在其坐标轴上的均匀分布是一种最简单、自然的分布形式，这种分布没有任何原因，不需要再作进一步的解释或作特别的定义；否则，如果自变量在其坐标轴上不是均匀分布的，而是按一定的变化规律发生变化，则必定存在更深层次的原因导致自变量的这种规律性的变化，而要描述这种规律性就必须寻找更深层次的原因，这一更深层次的原因显然可以看作比自变量更基本的自变量……这样就必然会导致对自变量定义上的无限循环。由此可见，如果不假设自变量的取值是均匀的，就不可能终止这种需要用更基本的自变量来定义高一级的自变量的无限循环过程。而时间作为自然科学特别是物理学中描述一切物质变化过程的自变量或者最基本的参数，其均匀性同样是作为一个公理被引进的，比如在描述物体运动的坐标系中一般都由三个空间坐标和一个时间坐标构成，时间坐标轴上的每一点代表一个时刻，显然，每一时刻在时间坐标轴上的分布是均匀的，正是时间的这种均匀的分布形式可以使时间成为描述一切物质变化过程的尺度及标准。

在人类历史上，最早提出时间是比物质的变化过程更为基本的对象以及时间具有均匀性概念的是古希腊哲学家亚里士多德，亚里士多德在《物理学》中这样叙述道："变化总是或快或慢，而时间没有快慢。因为快慢是用时间确定的：所谓快就是时间短而变化大，所谓慢就是时间长而变化小①。"按亚里士多德的观点，必须经过对运动或变化的量的比较才能对物体运动或变化的快或慢作出相应的结论，而时间就是对物体的运动或变化进行比较的基准，是描述物体的运动或变化的最基本的参量，因此时间无所谓快或慢。也就是说时间必须被假定为是均匀的，从而既不快也不慢，否则物体运动或变化的快慢将无法加以确定；另外，由于时间无法像力那样对物体的运动过程产生直接的作用，因此假定时间能够在我们不经意之间突然"加速（或减速）流逝"的现象的出现是没有任何意义，也是无法被任何科学实验证实的。在科学史上，最早将时间作为一个最基本的参数用于物理学研究的是伽利略（也有学者如迪昂等则持不同的观点，认为经院自然哲学家在早于伽利略时期就已经完成了对运动学问题的系统研究，以下是张卜天博士的相关论述："大约从 1328 年到 1350 年，牛津与巴黎的经院自然哲学家们在运动学方面作出了巨大的成就。他们第一次明确区分了运动学和动力学，清晰地定义了匀速运动、匀加速运动和瞬时速度，提出了将匀加速运动与匀速运动联系起来的默顿规则。'这是历

① ［古希腊］亚里士多德. 物理学［M］. 张竹明，译. 北京：商务印书馆出版社，1982：123.

史上自然哲学家第一次如此严肃地思考运动学问题，即用时间和空间的度量来研究运动'[①])。"正是凭借对时间的均匀性假设，伽利略系统地研究了物体的匀速直线运动及匀加速直线运动这两种最基本的运动形式，并且在详细研究了匀加速直线运动（包括自由落体运动）基础上，提出了物体运动的"加速度"这一重要概念，为运动学的发展及牛顿力学的建立奠定了坚实的基础，并且为之后物理学乃至自然科学的发展提供了标准范例。显然，在伽利略的所有关于运动学的研究中，时间都是作为比运动更基本的参数提出的，并且在对匀速直线运动及匀加速直线运动的表达式中，时间的取值都是均匀的，换句话说，这些运动完全是依据时间的均匀性进行定义的，而正是在时间的均匀性定义的前提下，通过对在相同时间段中物体运动路程的比较才能够确定物体运动的规律性。比如伽利略将匀速直线运动定义为运动的物体在任何相等的时间间隔里所通过的路程都相等，而将匀加速直线运动定义为运动的物体在任何相等的时间间隔里其运动速度的增加值都相等；显然，在伽利略关于匀速直线运动及匀加速直线运动的定义中，所说的任何相等的时间间隔本身就隐含了时间的均匀性，因为任意的时间间隔显然包括无限小的时间间隔。后来在伽利略建立的运动学基础之上，牛顿借助其创立的微积分这一数学工具对物体的最一般意义上的运动过程进行了精确的数学描述，并最终建立了系统的牛顿力学体系。而牛动力学对物体运动过程的数学描述仍然基于时间的均匀性，这样，伽利略和牛顿使用精确的数学工具，最终完成了亚里士多德试图借助时间概念实现对物体的运动过程描述这一梦想。而最早将时间的均匀性作为时间的性质清晰地表达出来的则是牛顿，牛顿在其绝对时间的定义中如此表述时间的均匀性：绝对的、真实的和数学的时间，按其固有的特性而均匀的流逝，与一切外在的事物无关。牛顿这一关于时间的观点，显然是在其力学体系创立过程中形成的，与牛顿力学的数学描述完全一致。牛顿认为，所有物体的运动都可能是加速的或减速的，但绝对时间的均匀流逝却不会因为任何原因而发生哪怕任何微小的改变，无论其运动是快是慢，或者根本不运动，一切存在物的延续性或持久性总是一样的。对于牛顿关于时间的均匀性流逝的假设，我们可以想象整个宇宙中存在着一只具有无限小振荡周期，并且每一个振荡周期之间不存在任何偏差的无形的理想时钟，整个宇宙的时间就是按这只钟所指示的数值逐渐展开，而宇宙中的所有物质都按这只时钟所赋予的时间存在并变化着，这样的时间显然具有理想的均匀性。其实，无论在牛顿力学、经典力学还是在经典的电磁理论中，时间都是作为具有连续性及均匀性的自变量，作为一个独立于任何变化过程的基本参数来看待的，也即这些物理理论体系（当然也包括物理学中的能量守恒定律）都是而且必须建立在时间的均匀性的

① 张卜天. 质的量化与运动的量化——14 世纪经院自然哲学家的运动学初探[M]. 北京：北京大学出版，2010：20.

基础之上，而当代科学界使用的振荡周期越来越短、再现精度越来越高的时钟就是基于这种观点建造的，正是由于采用了高精度时钟的计时单位对时间所进行的测量，才使得相应的测量赋予时间的测量值以均匀性，从而能够不断逼近具有均匀性的时间本身，实际上，牛顿力学、经典力学以及经典电磁学的成功，本身就间接证明了时间的均匀性。更为重要的是，物理学家借助严格的数学推理，证明了最具普遍意义的能量守恒定律恰恰与时间的均匀性有着完美的对应关系。正因为具有均匀性，时间在物理学中才可以作为不能够也不需要再进行深入分析的基本概念，从而哲学上关于时间的任何观点都不会对物理学中的时间概念的数学意义产生影响，也就是说在自然科学特别是物理学中，人们完全不需要知道时间的本质是什么，而只需要知道这是一切变化过程的最基本的参数，任何物质的变化过程都可以而且必须借助这一基本参数才能够进行精确描述即可，接下来的所有工作只是对描述物质变化过程的物理方程进行数学分析，即解方程。

虽然在爱因斯坦的广义相对论中时间仍然是一个用于描述一切物质的变化过程的基本的概念，但显然已经不是最基本的概念，广义相对论中最基本的概念已经被四维黎曼时—空所代替，而且爱因斯坦在其广义相对论中对时间的均匀性也有着完全不同的看法。爱因斯坦在其狭义及广义相对论中提出，时间不再是一个独立于物质变化过程、不受物质的变化过程影响的物理量，而是与物体的相对运动状态及物质的分布有关，并且物质的分布及运动状态会导致时空的相对膨胀及弯曲，所谓的钟慢效应就是其具体表现形式，特别是在弯曲的时空中时间发生了弯曲即非线性变化，从而时间具有不均匀性，也就是说在引力场中时间具有不均匀性。但是我们通过第 1 章第 1.3 节的详细分析所得的结论可知这一结论是完全错误的，我们知道运动并会不导致时间本身的膨胀，爱因斯坦在狭义相对论中提出的所谓时间的膨胀，其实是由空间的相对膨胀导致的时钟的计时单位的相对膨胀，进而造成时间的测量值非时间本身的相对“膨胀”的结果，这是一种虚假的、测量意义上的膨胀；同样的，物质的分布及运动状态也不会导致时间本身的弯曲或膨胀，爱因斯坦在广义相对论中提出的所谓时间的弯曲，其实是由空间的相对弯曲导致的时钟的计时单位的相对膨胀及非线性变化，进而造成时间的测量值的相对“膨胀”及弯曲的结果，这也是一种虚假的、测量意义上的“膨胀”及弯曲；也就是说，即使是在广义相对论所讨论的物质及其运动的环境中，时间本身同样具有均匀性，时间的均匀性是时间本身的一个重要性质，不会因为任何外在的条件而发生任何形式的改变。

2.3 时间的绝对性以及时间的测量值的相对性

时间具有绝对性这一观念的基本内容在古代人类文明中就已形成，特别是早在古希腊时期的哲学家们就对与绝对时间及相对时间相关的问题进行过详尽的讨

论;而到了17世纪,牛顿对绝对时间的概念进行了最经典的表述并借助数学语言将其用于对物质的变化进行科学的描述,牛顿在其科学巨著《自然哲学的数学原理》中提出的关于时间的绝对性观点是:"绝对的、真实的、数学的时间,这种时间由其本身的特性所决定,它均匀地流逝着,与外在的所有事物没有任何关系,因此,它又被称为延续的时间。而相对的、表象的和普通的时间是外在的并能被感知的,它是对运动的延续的度量,通常可用它来代替真实的时间[①]。"虽然牛顿在其巨著中提出时间具有绝对性,但仍然认为其测量值具有相对性。而牛顿的追随者的观点则更加激进,认为不但时间本身具有绝对性,而且由于时间的测量值不受任何因素的影响从而也可以认为具有绝对性,即不论运动方式及周围环境的引力作用情况如何,不论是在地球上、月球上抑或是在与我们相距几百万光年之遥的巨大恒星上,如果我们使用结构及精度相同的时钟对时间进行测量,那么我们所测得的时间应该完全相同,也就是说如果我们将这样的时钟放置在宇宙的任何角落,那么这些时钟的"嘀嗒"声都是完全相同的。在时间的绝对主义者看来,绝对的时间是独立于物质及其变化过程的一种非物质性的存在,表现为不断地从过去到现在再到未来的均匀性流逝,也就是说时间的绝对主义者关于时间的绝对性的观念包含关于时间的独立的存在性、均匀的流动性及流动的方向性等几方面的内容,其中时间的流动性及方向性是能够真正反映时间的绝对性的最重要的内容,对于这些内容我们将会在后面的章节里分别进行详细的讨论。

自从以伽利略变换为基础的牛顿力学体系建立之后,在绝对时间、空间等概念及相对性原理的基础上,经典力学、电磁学以及热力学理论陆续建立起来并且在人类的社会实践中取得了辉煌的成就。虽然牛顿力学是建立在绝对空间及绝对时间的基础之上,但牛顿所设想的我们周围绝对静止的空间看不见、摸不着,而且无法通过任何实验对其进行标记及定位,从而不能够作为一个参照物用以对物质的运动进行描述,而宇宙中任何星体都是运动的,从而也不可能作为绝对静止的参照物,可见,牛顿力学中并没有也不可能明确现实世界中什么对象可以作为绝对参照系;而在麦克斯韦建立电磁理论体系并发现能够在整个宇宙空间中自由传播的特殊的波——电磁波后,认为由于任何机械振动都必须借助介质才能够以波的形式向周围空间传播,因此电磁波作为一种波也必须借助介质才能够向周围空间传播,物理学家因此提出以太概念,并将以太看做一种充斥整个宇宙并且用于传播电磁波的连续介质。当时的物理学家们普遍认为可以将以太这种充斥于整个宇宙空间的物质的整体作为一种特殊的参照物并被认为是绝对静止的从而可以代表绝对空间,而宇宙中的其他所有物质相对于以太的运动便可以看做相对于绝对空间的运

① [英]艾萨克·牛顿.自然哲学的数学原理[M].曾琼瑶,王莹,王美霞,译.南京:江苏人民出版社,2011:7.

动，即绝对运动。这样，绝对空间的概念就有了坚实的物质基础，所有问题就集中在如何通过实验证明以太这种绝对静止的物质对象的存在，而这一问题可以通过观测地球相对于以太的运动速度来加以解决。

为观测地球相对于绝对静止的以太的运动，实验物理学家们提出了一系列实验，其中最著名的实验是1887年美国物理学家A·迈克尔逊与E·W·莫雷提出并完成的迈克尔逊—莫雷实验。原本两位物理学家试图用相应的实验证实以太这种具有绝对意义的参照系的存在，但实验的结果却证明光在任何参照系中及任何方向上的运动速度都是恒定不变的，这也就意味着或者根本不存在绝对静止的以太，或者以太完全被地球所带动从而与地球之间的相对速度为零(这一点与光行差效应所表明的以太不可能被地球所带动的现象明显存在矛盾)，从而必须假定以太是一个完全虚构的概念。这一实验结果使得科学家企图通过测量地球相对于绝对静止的以太的绝对运动速度从而证明以太这种绝对空间存在的期望完全落空，并且使得绝对时间及绝对空间的观念的基础发生了动摇，建立在这两个概念基础上的牛顿力学也面临被推倒重来的局面。在相对论出现之前，为了能够挽救濒于倾覆的绝对时间及绝对空间的概念以及经典力学体系，从而能够在绝对时间及绝对空间观念的基础上解释迈克尔逊—莫雷实验，物理学家先后提出过各种假说，其中以洛伦兹的假说最为有名。在假说中洛伦兹提出：当长度为L的物体以速度V相对于绝对空间—以太参照系运动时在运动方向上该物体的长度会发生收缩，即物体的长度由原先的L收缩为$L\sqrt{1-V^2/C^2}$，其中$\sqrt{1-V^2/C^2}$为收缩因子，这就是著名的洛伦兹收缩。洛伦兹认为这种收缩应该是一种真实的物理效应，完全可以通过相应的物理实验进行验证，并且认为在物体的长度收缩的同时构成物体的分子之间的静电相互作用力也会因此而发生变化。需要指出的是由于洛伦兹收缩是一种与参照系的运动相关的协变效应，因此根本不存在所谓的伴随着洛伦兹收缩所发生的构成物体的分子之间所存在的相应的分子静电力的作用的变化，从而这种作用的存在用实验是无法证实的，“例如1903年特劳顿与诺布耳的实验就是利用地球相对于以太的运动将使荷电电容器上产生一力偶矩的效应来测定地球(相对于绝对空间—以太)的速度，这一效应也是二级的。然而在二级准确度上并未观察到任何力偶矩[①]。”此外，为了建立一套能够前后一致的、理解迈克尔逊—莫雷实验的、完整统一的理论体系，洛伦兹认为还需要在长度收缩等概念的基础上再添加与时间t具有不同意义的所谓“地方时间t'”的概念，并且认为t'并不是真实的时间(因而没有实际意义)而只有t才是真实的、具有实际意义的时间；除了上述假定之外洛伦兹认为还必须同时假定物体的质量在运动方向上会因为物体的运动而增

① 曹昌祺.电动力学[M].北京:高等教育出版社,1985:264.

大。正是在这样一些包括绝对时间及绝对空间(以太)等概念基础上洛伦兹导出了著名的洛伦兹变换,并指出在相对运动的坐标系之间只有通过洛伦兹变换才能确保麦克斯韦方程组的数学形式保持不变;而在洛伦兹变换的基础上洛伦兹反过来又考虑了包括时间间隔的膨胀、长度收缩等一系列问题,从而使这些问题能够在洛伦兹变换关系中得到统一的解释;但由于洛伦兹的理论是建立在多个无法用实验进行证实的假设的基础上,整个理论体系概念庞杂、逻辑混乱,而且从该理论体系推导出的一系列结论始终无法得到实验的证实,最终没有得到物理学家们的广泛认同。

爱因斯坦则通过对麦克斯韦电磁学理论的分析认识到电磁波在真空中传播的速度为恒定值 C,并且这一速度与电磁辐射源的运动速度无关,即电磁辐射源相对于任何一个惯性参照系的速度都是不变的(这种认识与当时主流物理学家们普遍认为的“电磁波是在以太中的传播并且传播的速度也是恒定值 C”的观念完全不同),这也就意味着电磁学现象不可能将绝对空间—以太与普通的惯性参照系区分开来,从而对电磁学现象而言所谓的绝对空间与普通的参照系相比没有任何特殊之处,因此借助电磁学现象无法证实绝对空间的存在,也即绝对空间的存在没有任何意义,这一点与迈克尔逊—莫雷实验的结论完全一致。爱因斯坦通过研究发现,如果人们坚持认为伽利略变换这一反映绝对时间及空间观念的数学表述形式是正确的,则由于在某一惯性参照系 K 中测得某一电磁波在真空中传播的速度为恒定值 C,那么在另一个以速度 V 相对于参照系 K 运动的参照系 K' 中的观察者所测得的该电磁波的速度就不可能是恒定值。即如果观察者 K' 沿着与光传播方向相同的方向运动,则观察者 K' 测得的光传播的速度比参照系 K 中的观察者所测得的光的传播速度要低;反之,如果观察者 K' 沿着与光传播方向相反的方向运动,则观察者 K' 测得的光传播的速度比参照系 K 中的观察者所测得的光的传播速度要高,这一点显然与迈克尔逊—莫雷实验的结论是矛盾的。而这一矛盾是由于对光的运动(或者电磁场方程)的伽利略变换导致的,可见电磁学理论与伽利略变换从而与绝对时空观之间存在着深刻的矛盾。爱因斯坦据此提出,在肯定电磁学理论符合相对性原理的前提下要解决这一矛盾,一种做法是否定电磁学理论并对其进行修改,另一种做法则是认为伽利略变换公式存在问题从而需要对其进行重新考虑。显然,要从根本上否定麦克斯韦电磁学理论所需付出的代价太大,毕竟电磁学理论经过了各种复杂实验的检验,特别是该理论的结论与迈克尔逊—莫雷实验完全一致;而修改伽利略变换虽然代价较小,但却不得不对伽利略变换以之为基础的牛顿的绝对空间及绝对时间的观念进行根本修正,否则修改伽利略速度变换公式是完全不可能的。通过对麦克斯韦电磁学理论与牛顿的绝对时空观念之间存在的矛盾的详细分析,爱因斯坦认为牛顿的时空观念及牛顿力学只能看做是真实世界

在低速、小范围情况下的近似反映,将这种观念及相应的理论不加分析地推广至物质运动在高速及大范围的情况是不可能正确的。为协调经典力学与电磁学理论之间的矛盾从而建立能够兼容经典力学及经典电磁学理论的全新的理论体系,必须建立全新的时空体系,在这种新的时空体系中必须认为时间及空间具有相对性,特别是必须否定同时性、长度及时间间隔等概念的绝对性。为建立不同于伽利略变换并能够适合电磁学理论的不同参照系之间的速度变换关系,爱因斯坦仅仅从两条简单的原理——光速不变原理(该原理在电磁学理论中是麦克斯韦电磁场方程的一个重要结论,并且得到迈克尔逊—莫雷实验的证实)和相对性原理(该原理在牛顿力学中也作为一个基本原理,并且具有广泛的实验基础)出发就轻而易举地推导出洛伦兹变换,从而把洛伦兹变换作为新的力学体系及新的电磁学理论体系的共同基础。爱因斯坦以新的时空观为基础推导出的不同参照系之间的变换关系,虽然与洛伦兹当年提出的洛伦兹变换公式具有完全相同的数学形式,但两者之间却有着完全不同的意义,洛伦兹认为时间与空间具有绝对性而爱因斯坦则认为时间与空间具有相对性。为此,爱因斯坦将洛伦兹变换中的时间 t 及 t' 分别理解为具有相对运动的两个参照系中的时间,这两个时间都是真实的时间从而都具有实际意义,并通过对几个理想实验的分析得出同时性具有相对性、运动参照系中的时间膨胀(即时间的相对性)及运动的刚性量杆的长度缩短,特别是如果两个参照系之间的相对运动速度达到光速时,其中一个参照系中的观察者会看到另一参照系中的时间会完全静止等彻底颠覆人类的时空观念的结论。正如丹麦科学史学家赫尔奇·克劳在其著作中所叙述的:“跟洛伦兹和庞加莱不一样,爱因斯坦的公式是相关于真实的、物理可测的空间和时间的。一个参照系跟另一个参照系一样的真实。从运动方程导出速度相加公式、运动物体的收缩以及时间的膨胀,即时间间隔是相对于观察者的速度的。爱因斯坦变换后的时间跟任何时间一样真实。而且,在这方面跟洛伦兹的当地时间很不一样。两个速度 u 和 v 的相加给出最后的速度 $V=(u+v)/(1+uv/c^2)$。爱因斯坦注意到,这意味着反直觉的结果,即光速是独立于光源速度的[①]。”借助其意义被重新诠释过的洛伦兹变换及相对性时间及空间的概念体系,爱因斯坦建立了狭义相对论的理论体系。在狭义相对论中爱因斯坦将具有相对性意义的时间及空间整合为具有绝对性的四维时—空,该理论体系使麦克斯韦的电磁场方程具备了协变的形式,从而确保电磁场方程能够在不同的参照系中都具有完全相同的数学形式,使得电磁学理论完全满足了相对性原理,同时,经典力学又被作为狭义相对论在所描述的物质对象在运动速度远低于光速情况下的一种近似情况加以描述。

---

① [丹]赫尔奇·克劳.量子时代[M].洪定国,译.长沙:湖南科学技术出版社,2009:106.

在狭义相对论中,爱因斯坦认为必须放弃牛顿力学体系中涉及所有时钟都能够测量到的所谓的普适的、绝对的时间的观念。因此而得到的其中一个重要结论是,对于某一参照系中同时发生的两个事件在不同的参照系的观察者看来这种同时性具有相对性;另外一个重要结论是,每个观察者都必须有所在参照系的时间,除非两个(或多个)观察者之间相对静止,这两个(或多个)观察者的时间才会完全相同,否则,如果这两个观察者之间存在相对运动,那么他们所测得的时间必定会完全不同。即狭义相对论认为时间是相对的而不是绝对的,时间的相对性包含同时性的相对性及不同参照系中的观察者测得的时间的相对性(确切地说相对于某一参照系 K 运动的参照系 K' 中的时间与参照系 K 中的时间相比会发生膨胀)等内容。同时性的相对性仅仅是关于两个事件之间在发生的顺序上的一种关系而非时间的内容。在狭义相对论中所谓时间的相对性(即时间膨胀)是指对于存在相对运动的两个惯性参照系 K 及 K',如果这两个参照系之间相对运动的速度为 V,并且经过一段时间后 K' 系中的时钟所记录的这段时间是 t,那么在 K 系中的观察者用 K 系中的时钟所测得的 K' 系中的时钟记录的这段时间为 $t'=t/\sqrt{1-V^2/C^2}$。显然,K' 系中的时钟的周期较 K 系中的时钟的周期长,换句话说 K' 系中的时钟的频率较 K 系中的时钟的频率小,即 K' 系中的时钟较 K 系中的时钟的慢;反之,如果 K 系中的时钟所记录的这段时间是 t,那么在 K' 系中的观察者用 K' 系中的时钟所测得的 K 系中的时钟记录的这段时间为 $t/\sqrt{1-V^2/C^2}$。此即狭义相对论中的钟慢效应,而且这种效应具有相对性。因为时间是由时钟测量的,并且动系中的一切物理过程(包括时钟钟摆的摆动)都相对变慢了,所以在爱因斯坦看来时间也不例外地变慢(膨胀)了,此即通常所谓的"时间膨胀"。而我们在第 1 章第 1.3 节中通过对物质完成其变化过程所需要的时间的详细分析论证得出,是物质完成其变化过程所需要的时间具有相对性而非时间本身具有相对性,这也就意味着所谓的"时间膨胀"从而时间具有相对性的结论是错误的(即时间并不发生膨胀),在这个意义上我们可以说是时间的测量值而非时间本身具有相对性。

由于狭义相对论只适用于惯性参照系,即只能适用于物质作匀速运动的情况的描述,而就实际情况而言这种参照系并不存在,特别是在广袤的宇宙空间中分布着由物质构成的包括恒星及绕恒星运行的行星等大小不一的各种天体,而凡物质之间均存在万有引力相互作用,即宇宙中的所有物质都处于引力场中,受到万有引力的作用,从而任何物质的运动都不可能是匀速直线运动,也即真正的惯性系是不存在的。受到狭义相对性原理的启发,爱因斯坦认为对于描述物质的运动规律而言惯性系并非是一种特别的参照系,从而认为可以将狭义相对性原理推广至任意类型的参照系的情况,即对宇宙空间中存在的任何形式的参照系而言任何一条物

理定律都应该具有完全相同的数学形式，这就是广义相对性原理。从牛顿的万有引力定律可知任何一个物体因为有质量的缘故从而都会对其他物体产生万有引力作用，通常将这种质量称做引力质量(万有引力就是由这种质量产生的)；而牛顿第二定律指出任何一个物体因为有质量(这种质量被称做惯性质量)从而在力的作用下会产生加速度，如果将牛顿的万有引力定律用于描述处于引力场中的物体的运动则结合牛顿第二定律可以得到引力质量等于惯性质量，这一规律不仅能够从牛顿力学中导出，而且得到了所有相关实验的精确证明，爱因斯坦认为这一规律在宇宙中是普遍成立的并将此规律称做等效原理。以等效原理为出发点，爱因斯坦将广义相对性原理应用于引力场中的局域惯性系并结合狭义相对论的如光速不变原理等结论最终建立了广义相对论。与狭义相对论类似，广义相对论中的时间及空间同样具有相对性；而与狭义相对论不同的是广义相对论得到的结论是在引力场中时间及空间都发生了弯曲，在此意义上狭义相对论则作为广义相对论在引力场强度等于0(从而时间及空间时平直的)的特殊情况。广义相对论告诉我们，由于在引力场中时间及空间发生了弯曲，从而如果在引力场中某一点上放置一台时钟，假定在该空间点上的观察者测得的该时钟的钟摆完成一次摆动所需要的时间(即钟摆的摆动周期)是1秒，则在远离该引力场的惯性系 K 中的观察者测得的该时钟钟摆的摆动周期是 $1+\frac{\kappa}{8\pi}\int\frac{\sigma \mathrm{d}V}{r}$ 秒(其中 $\kappa=1.86\times10^{-27}$，$\sigma$ 为静止时的物质密度，r 是时钟所在之处的空间位置与引力中心的距离)，由此可见，在惯性系 K 中的观察者看来时钟所在位置上的引力场强度越大，时钟的钟摆完成一次摆动所需要的时间就越长，特别是如果该时钟放置在一种特殊的天体——黑洞的视界内，则由于时一空极度的弯曲最终会导致时钟的钟摆完全停止摆动，与相对于某一参照系 K 而言作高速运动乃至接近光速运动的参照系 K' 中的时钟会停止摆动进而其中的时间也会停止流逝一样，爱因斯坦认为黑洞的视界内的时间也会因时空的极度弯曲而停止流逝。在广义相对论中时间与空间的弯曲方式由物质的能量及动量密度在时间一空间中的分布决定，而反过来时间一空间的弯曲又决定物体的运动轨迹。需要特别指出的是在引力较弱及时空弯曲程度较小时广义相对论对物体之间的万有引力的描述可以近似地表达为牛顿的万有引力定律，由于牛顿的万有引力定律得到了关于对太阳系的天文观测的证明，从而也佐证了广义相对论在引力场较弱情况下的正确性，当然，广义相对论所描述的现象不仅仅是这些，随着对广义相对论中最著名的如水星近日点的反常进动、光的引力红移及雷达波的回波延迟效应等预言的证实，广义相对论逐渐被几乎所有的物理学家所接受。

爱因斯坦的狭义及广义相对论的理论体系迄今为止已获得了无数实验的检验而大获成功并被人们普遍接受，并且相对论中时间的相对性观念自相对论创立以

来很少有人对其产生过质疑，但在相对论中否定绝对时间及空间并将两者整合为四维时—空的方法导致人们对时间的理解变得异常困难，特别是当物理学家们将量子力学应用于广义相对论从而试图获得更普遍意义上的理论时，时间概念分别在这两种理论体系中所起的作用以及两种理论对时间对象不同的处理方式立即成为阻碍两种理论融合的一大障碍之一。与相对论不同，量子力学对时间的处理方式与人们对时间的常识性理解基本相近，即将时间看做与空间完全不同并独立于空间的一个参数，量子力学以这种方式建立的偏微分方程同样极其精确、成功地实现了对微观现象的描述。由两种数学表达形式完全不同甚至相互矛盾的时间概念建构的相对论及量子力学理论体系均成功地对相应范围的物质变化过程进行了精确的描述，但这并不不意味着两种时间概念都同样正确，其中之一必定是有问题的，或者至少在数学表达形式上是需要修正的。因此要建立一种能够将相对论及量子力学相互融合的所谓量子引力理论，我们只能采用其中一种时间概念，并且以此对另一时间概念进行重新诠释，使两种时间概念的数学表达形式完全等效。而我们知道，如果将相对论的四维时—空概念及相应的数学结构直接应用于量子力学时将立刻产生无穷大的结果；另外，近年来也有物理学家将相对论中的四维时—空概念的时间和空间有条件地割裂开来而建立起一种与相对论基本等效的理论，该理论同样能够较好地解决一些问题并取得初步成功。这也就意味着相对论中的四维时—空的概念也许并非如相对论物理学家所坚持的是所有物理学理论都必需的时—空结构，因此应该可以用另一种等效的数学形式重新表达。

虽然存在许多难以解决的问题，但相对论物理学家并没有要放弃四维时—空这一理论构架的打算，而仍然在努力寻找将这一时空结构应用于量子引力理论中的方法，但在上面第 1 章第 1.3 节中的详细分析告诉我们，所谓的四维时—空结构仅仅具有方法论意义，并非现实世界真实的结构，也即所谓时间的相对性（包括时间的膨胀及弯曲）也仅仅是测量意义上的，而非时间本身的性质。这些内容我们在上面已经进行过详尽的分析，下面我们只作简单的说明。我们知道，狭义相对论中使用的所谓的时间本质上是用时钟进行测量得到的时间测量值而非时间本身。时钟钟摆的摆动周期是时钟的钟摆完成一个来回的摆动所需要的时间，根据狭义相对论，物质完成其变化过程需要的时间具有相对性，从而时钟钟摆的摆动周期同样具有相对性，这样，用不同参照系中的时钟对同一时间间隔进行测量获得的测量值就具有相对性，为真正贯彻相对性概念，爱因斯坦认为“时间本身”这一具有绝对意义的概念是不符合相对性原理的，从而必须加以抛弃并以时间的测量值这一概念替换，由此得到时间具有相对性的结论。可见，相对论中所谓的时间具有相对性的结论是用时间的测量值代替“时间本身”而作出的，这显然是偷换概念的做法。实际上，根据第 1 章第 1.3 节中的分析我们获得了时间具有绝对性的结论，而时间的

测量值本质上是用时钟对具有绝对性的时间进行测量而获得的。显然，时间的绝对性是时间测量值具有相对性的前提条件，就是说正是由于时间具有绝对性，我们对时间进行测量所得到的测量值才具有相对性。实际上如果真的如狭义相对论中所说的在运动的参照系中的时钟的频率变小了(即时钟变慢了)，即在静止的惯性参照系中的观察者测得的运动的惯性参照系中的时钟周期是 $T'=\frac{T}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$，而如果我们因此就认为相对于静止参照系中的观察者而言相应的时间流逝的速度也相对变慢了，即如果静止的惯性参照系中经历的时间间隔为 Δt 时则在运动参照系中与之对应的时间间隔为 $\sqrt{1-V^2/C^2}\Delta t$。那么，对已校对好的时钟而言相对于静止参照系中的观察者而言运动参照系中的观察者使用所在参照系中的时钟对时间 $\Delta t'=\sqrt{1-V^2/C^2}\Delta t$ 进行测量的实际测量值应该为 $\Delta t'=\sqrt{1-V^2/C^2}\Delta t\cdot\sqrt{1-V^2/C^2}=(1-V^2/C^2)\Delta t$ 而非 $\sqrt{1-V^2/C^2}\Delta t$。即相对于静止参照系中的观察者而言，动系中的观察者用频率按路径膨胀系数为 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ 变慢的时钟对流逝速度变慢的时间进行测量，所得到的时间的测量值与不考虑时间的相对膨胀的情况相比会更小。这一结论与狭义相对论中的洛伦兹变换是矛盾的。而如果我们假定相对于静止的惯性参照系的时间 t 而言运动的惯性参照系中时间的流逝速度保持不变(即时间具有绝对性)，那么用频率按膨胀系数为 $\frac{1}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$ 变慢的时钟测得的运动的惯性参照系中的时间就应该是 $t'=\frac{t}{\sqrt{1-V^2/C^2}}$，这一结论与相对论中用时钟测得的时间代替绝对时间得到的所谓洛伦兹变换即从一个惯性参照系到另一个惯性参照系的时间变换的结论完全一致。另外，由前面第 1 章第 1.3 节中相关的分析我们知道，广义相对论中通过对放置在引力场中的时钟的计时规律的分析得出的引力场中确定的空间位置 D 上的观察者测得的该局域范围中的时间相对于远离引力场的观察者测得的引力场中空间位置 D 上时间变慢或者弯曲的结论，以及在引力场中引力场强度较强之处的时间较引力场强度较弱之处的时间变慢或者弯曲的结论是不正确的。所谓“在引力场中引力场强度较强的空间位置上的时间，较引力场强度较弱的空间位置上的时间变慢”的结论完全是由“放置在引力场中引力场强度较强的时钟相对于放置在引力场强度较弱的空间位置上的时钟变慢”这一结论直接推论出的。由于引力场中引力场强度较强之处的时钟的频率变小了，因此对时间的测量值也变小了，从而时间流逝的速度也同步地变慢了。从上面第 1 章中的【结论五】我们知道，在引力场中由于物质完成某一变化过程所经历的“变化路径”的长度具有相对性，从而该物质完成同一变化过程所需要的时间

间隔(而不是时间本身)具有相对性,具体情况可以分别用公式(1.11)及(1.10)进行描述,因此相应的时钟钟摆完成其每一个摆动周期需要的时间也具有相对性,而且用时钟对任何一个确定的时间间隔进行测量获得的测量值也具有相对性。需要特别指出的是,如果真如爱因斯坦在其相对论中所说,"时间本身"是没有意义的,那么对其进行测量所获得的测量值也同样如此,因此可以说"时间本身"并不像爱因斯坦所认为的那样是一个没有意义的概念,因为时间的测量值实际上就是用时钟对"时间本身"进行测量而获得的数值,在使用时钟对时间进行测量时时间本身就是被测量的对象,而时间的测量值则是对时间本身的测量结果,从而相对论中所谓的时间膨胀或时间弯曲都只是时间测量值而非时间本身所具有的性质。可见用时间的测量值替代"时间本身"这一概念的做法本身就是不正确的,由时钟变慢这一前提只能得到"时间本身"的测量值具有相对性而不可能逻辑推导出时间具有相对性的结论,两者之间没有必然的联系。因此我们可以获得完全不同于狭义或广义相对论的重要结论:**时间本身具有绝对性而其测量值则具有相对性**。这也就意味着狭义或广义相对论中一维时间与三维空间整合成的所谓四维时—空是宇宙中根本不存在的、虚拟的对象,是为研究的方便而人为构造出来的理论上的结构,四维时—空概念只有方法论的意义而根本没有实在的、本体论的意义,充其量仅仅是对具有绝对性的时间的一种等效的表达方式,而在下面进一步讨论中我们将看到,真实的时—空结构应该是一维虚拟线性时间(确切的是零维时间)+三维弯曲空间,也是量子引力理论中必须采用的时空结构。当然,我们这里提出的具有绝对性的时间与牛顿的绝对时间是完全不同的,牛顿的绝对时间是脱离所有物质变化过程、不受物质及其运动的影响独立存在的对象,而我们这里提出的具有绝对性的时间是隐含在物质变化过程中、与物质的变化过程密不可分的时间本身间隔的绝对性,即时间本身的间隔不受物质及其变化的影响,永远与相应的物质变化过程相关联。

2.4 时间不具有方向性

时间具有方向性的观念是人类在长期的社会及生产实践中形成的,但自从这一观念产生起迄今为止却很少有人对其产生过质疑,现在已经成为人类全部知识领域的一条非常重要的公理,这一点就连辩证唯物主义者也是认可的,以下自然科学领域的流行观点辩证唯物主义基本上都全盘接受:"孤立系统中的不可逆过程将最终导致熵为极大值的状态,封闭系统中的不可逆过程将最终导致自由能最小的状态,近平衡系统中的不可逆过程将最终导致熵产生最小的状态,这些都显示了时间的方向性,突出了时间箭头的意义。从更广泛的范围来看,暴涨宇宙论和大爆炸宇宙论所揭示的宇宙演化的不可逆过程表明了宇观(胀观)范围内时间对称的破

缺，生物进化论揭示的物种进化的不可逆过程表明了生命领域中时间对称的破缺，1964年菲奇和克罗宁发现的C(电荷共轭)和P(宇称)联合变换在弱相互作用下不守恒则可能表明了微观领域内时间对称的破缺。可以说，在各个领域中，不可逆过程都是和时间箭头联系着的[①]。”并且认为“时间的特点是一维性或不可逆性。这是指时间只有从过去、现在到将来一个方向，它的流逝总是沿着单向前进，去而不返，不可逆转[②]。”需要说明的是，这里所说的方向性或不可逆性是对物质的变化过程而言的，即“可逆与不可逆是刻画过程的概念，它们是对一定过程而言的。单一状态不存在可逆或不可逆的问题，只有对两种以上状态所构成的过程才谈得上可逆或不可逆[③]。”我们知道，任何人都无法超然于生、老、病、死的生命过程之外，任何物种都要经历从产生到兴盛到衰落再到消亡的过程，宇宙中几乎所有恒星都要经历从诞生到发光发热再到星体爆发而后成为白矮星直至缓慢的变冷变暗这样一个不可逆的演化过程……，也就是说包括生命过程在内的所有物质的变化过程都具有不可逆性即方向性，这一方向常常被物理学家归结为热力学箭头。正是由于热力学箭头的存在，使得过去的事情由于已经发生从而成为无法改变的、对我们来说只能不断回味的历史，而未来的事情由于还未出现因此是具有多种可能性的、在我们的努力下可以实现的梦想，这就是过去与未来的状态的不对称性，也常常被人们称做时间的单向性即时间的箭头。所有这些关于变化过程的方向性、不可逆转性以及过去与未来的不对称性的认识都是被我们人类的实践经验科学理论证实过的内容，并且都被认为是构成了我们关于时间具有方向性的认识的基础，从而使我们能够对时间的方向性可以有更深刻的认识及理解。需要特别说明的是在物理学中并没有任何关于时间的方向性的明确定义，关于时间的方向性的科学认识完全来源于热力学的研究、来源于对任何其变化过程具有方向性的系统的变化规律高度概括的热力学第二定律的内容。

由于时间是标量而非矢量，因此时间的方向性必定与其流动(流逝)性有关，特别的时间的方向性与其流动性之间是互为前提、相互依存的关系；即如果没有方向性，时间的流动性就无从谈起，而如果没有流动性，时间的方向性也就没有任何意义。由于任何所谓的流动都是具有方向性的流动能，从而时间的方向就是时间流逝的方向。时间流逝的方向通常可以表述为时间总是不断地从过去到达现在再到达未来的方向(后面我们将证明时间具有流动性的概念是不正确的)，其在时间坐标轴上表示为时间的数值由小变大、从左到右的方向。时间具有方向性表明时间的过去与未来是完全不同的，我们可以由此将时间的过去与未来区别开来。但由

---

① 国家教委社会科学研究与艺术教育司.自然辩证法概论[M].北京：高等教育出版社，2002：62.

② 李秀林，王于，李淮春.辩证唯物主义和历史唯物主义原理[M].4版.北京：中国人民大学出版社，1995：43.

③ 国家教委社会科学研究与艺术教育司.自然辩证法概论[M].北京：高等教育出版社，2002：60.

于时间看不见摸不着，因此我们只能通过对物质的变化过程的研究才有可能确定时间的流逝及其方向，而描述物质变化过程的物理方程在关于时间对称变换后其数学形式会产生相应的变化，从而时间流逝的方向性应该与描述物质变化过程的物理方程关于时间的对称性变换之间存在着密切的关系。这样，通过对物理方程的时间对称变换的研究就可以揭示物质的变化过程的方向性与时间流逝的方向之间的关系。人们通常认为由于基本物理方程如牛顿力学、麦克斯韦电磁理论、相对论以及量子力学等描述最基本的物质的变化过程的物理方程具有时间反演变换($t\rightarrow -t$)不变性，即被这些物理方程描述的物质的变化过程及其逆过程都是可能的变化过程从而这些物理方程无法区分出这两个互逆的变化过程。如对于两个弹性钢球相互接近而后在相互碰撞后又相互分开这一过程，其相反的过程也是两个弹性钢球相互接近而后进行碰撞并再次相互分开，显然这两个过程是无法区分并且均是可以实现的，也即该变化过程既可以在时间的正方向上也可以在时间的负方向上发生，从而这些物质的变化过程相对于时间具有对称性也即不具有方向性，人们因此认为在这些变化过程中时间既可以向正方向也可以向负方向流逝，从而时间没有特殊的方向。但描述平衡态乃至远离平衡态的热力学系统的物理方程则不具有时间反演变换($t\rightarrow -t$)不变性，即热力学系统的变化过程对时间反演变换具有不对称性，即与基本物理方程不同的是当把描述孤立的热力学系统变化过程的方程中的时间 t 用 $-t$ 代替时方程的形式完全不同，因此热力学系统的变化过程及其逆过程是两种完全不同的变化过程从而需要用不同的物理方程加以描述，从而时间反演方程及原方程两者具有完全不同的解，这也就意味着对描述孤立的热力学系统变化过程的方程而言过去(对应于系统的非平衡态)与未来(对应于系统的平衡态)完全不同，从而热力学系统的变化过程是不可逆的。如一个热力学系统其初始温度(或分子、原子密度)的分布是不均匀的也即系统处于非平衡态，随着时间的流逝系统自发地趋于温度(或分子、原子密度)均匀分布的平衡状态；而相反的过程则是不可能自然发生的：即对于初始温度(或分子、原子密度)均匀分布、处于平衡态的热力学系统，随着时间的流逝该系统逐渐呈现温度(或分子、原子密度)分布不均匀的非平衡态。也即在热力学系统中自然发生的变化过程的逆过程是不可能自然地发生的，从而热力学系统的变化过程是不可逆的，也即该变化过程只能在时间的正方向上发生而不可能在时间的负方向上发生，从而这些物质的变化过程相对于时间不具有对称性也即具有方向性，人们因此认为在这些变化过程中时间只能向正方向而不可能向负方向流逝，从而时间具有方向性。这就使得时间的方向性在这些不可逆的变化过程中凸显出来，这种方向性与我们长期积累的生活经验所形成的时间不断从过去到现在再到未来这一观念完全一致，科学家把热力学系统的变化过程的方向性定义为热力学箭头。

热力学方程的时间反演变换对称破缺向我们揭示了热力学系统变化过程的不可逆性，但对于热力学系统变化过程为什么具有不可逆性？不可逆性的本质是什么？对这些问题时间反演变换并没有也不可能向我们提供任何线索，而这些内容正是物理学家通过对热力学系统变化规律的系统深入的研究发现的。在热力学理论建立过程中科学家通过对热机工作过程的深入研究发现任何热机在工作过程中除了有一部分热量用于对外做功之外其余的热量都会以各种不可控制的方式扩散至周围环境中，从而使热机逐渐丧失了继续做功的能力，而相反的过程——即扩散到周围环境中的热量在一瞬间以完全一致的行为集中到热机中致使原本没有做工能力的热机突然开始工作起来并对外做功这一过程——则永远不可能发生，虽然这一过程并不违反能量守恒定律，从而热机的工作过程是不可逆的。科学家通过对热机的工作过程的详细研究发现了可以用于表征热机等所有处于平衡态的热力学系统的状态函数熵 S。态函数熵通常定义为：对于处于平衡态的热力学系统，该系统从状态 A 到状态 B 的变化可以用态函数熵 S 进行相应的描述，即$S_B - S_A = \int_A^B \frac{\mathrm{d}Q}{T}$，从熵的定义内容可见热力学系统的熵只与热力学系统在 A 与 B 上的状态有关而与热力学系统所经过的路经没有任何关系，在此基础上科学家又将态函数熵 S 与热机的不可逆过程联系了起来，并用态函数熵科学地描述了热机的不可逆的工作过程的本质规律，这就是热力学第二定律，其内容可以表述为：在任意一个孤立的热力学系统中，任何变化都不可能导致系统的熵的总量值的减少，即 $\mathrm{d}S \geqslant 0$。特别的，如果 $\mathrm{d}S = 0$，即如果热力学系统的熵不变则相应的变化过程是可逆的；如果 $\mathrm{d}S > 0$，即如果热力学系统的熵随时间的流逝不等于 0，那么系统的熵只能不断增大，从而相应的热力学变化过程都是不可逆的，也即热力学系统的变化只能在时间的正向流逝的方向上发生，从而时间箭头便在热力学系统的变化过程中呈现出来。热力学第二定律的另外一种关于变化过程的方向性的等价表述是热量只能自发地从高温区域（或物体）流向到低温区域（或物体）而相反的过程则不可能自发发生，也即不具有时间反演变换不变性。热力学第二定律或者熵增加原理就是描述自然界演化规律的最基本的规律，熵是描述热力学系统状态的物理量，其变化方向可以表征热力学系统自发过程的方向，熵增大的方向就是孤立的热力学系统自然发生的方向，并且也表征了时间流逝的方向，此即所谓的时间箭头。热力学第二定律虽然是通过对热机的工作过程的研究中发现的，但却具有普遍意义，特别是对于自然界中任何一个有限尺度的孤立的平衡态热力学系统都完全有效，即在这些系统中熵总是单调增加的，因此熵成为度量任何一个平衡态热力学系统变化过程不可逆性的尺度，时间总是从过去向现在再向未来的流逝的，关于时间流逝的方向的观念就因为热力学第二定律的普遍意义似乎具有了坚实的科学基础。在宇宙中的一切物质变化过

程中熵增(即不可逆)是最普通不过的事情,正如吴国盛教授在其著作中所描述的:"随着时间的流逝,繁华的城市成为废墟,满头青丝的少女成了白发苍苍的老妇。人类的赫赫伟业,总是在时间车轮下被碾个粉碎。'过时了'这个常见的否定性用语,充分体现了时间的毁灭力量。古今诗人对此感慨万千,罗马诗人卢克莱修写道:难道你未曾看见/石头如何也为时间所征服?/未曾看见高大的塔如何成为废墟,/石块如何圮毁?神殿和神像/如何破坏倾毁?未曾看见/神灵的威力并不能推进/命运的终点,或抗拒自然的命令?[①]"而在我们的日常生活中也常常能观察到自然界中熵的增大现象:一碗水撒在地面上以后一部分被地面吸收而另一部分则蒸发到周围环境中;煤炭燃烧后留下无法再重新燃烧的白色灰烬;一个玻璃杯掉到地上被打碎;一滴墨水滴入一杯水中后墨水逐渐均匀分散到水中;鸡蛋打到碗里被筷子搅动后最初是相互分离的蛋清与蛋黄最终被均匀混合在一起;任何动物个体从一出生开始就处于不断衰老从而熵不断增大的过程,随着时间的推移,动物个体最终都将走向死亡等等,这些都是熵增大的现象。显然与上述过程相反的是熵不断减小的过程,这样的过程被认为几乎不可能发生,从而上述过程通常被认为具有不可逆性,从以上(以及其他我们日常生活中经常观察到的)复杂的变化过程中我们体验到了时间从过去到现在再到未来的不断流逝,体验到了时间的方向性。由于热力学第二定律决定了时间流逝的方向,而我们永远无法阻止自然界中熵的增大,从而我们也不可能改变时间流逝的方向。正是基于热力学第二定律的普遍性,开尔文与克劳修斯等科学家甚至将适用于任何一个有限尺度的平衡态热力学系统的热力学第二定律推广到了整个宇宙空间,认为在某种意义上完全可以把整个宇宙看做一个与"外界"不发生任何能量及物质交换的孤立的热力学系统,这样,我们同样可以用熵值来衡量作为一个热力学系统的宇宙是否在逐渐衰老。将热力学第二定律应用于整个宇宙的结果是导致了宇宙一直处于不断衰亡的漫长演化过程中,正在逐渐逼近黑暗阴冷的、没有生命的死寂状态,而且现代宇宙学的研究成果对这一结论提供了更加强有力的支持,虽然辩证唯物主义者反对这种推论,但至少到目前为止科学界还没有提供足够的证据证明整个宇宙的死寂是可以避免的,对于这样的结论,哲学的思辨提供的论证则更显得苍白无力。热力学第二定律被科学界奉为物质的变化过程中必须首先遵循的规律即"第一定律",这样,热力学理论特别是热力学第二定律就将时间具有方向性的观念建立在科学实验的基础上,从而使不可逆现象真正成为物理学研究的对象。正如刘辽、赵峥等教授在其著作中所说的(实际上也是当前被人们所普遍接受的):"热力学第二定律明确指出了时间的方向性、流逝性和不可逆性。正是这条定律,成为哲学界探讨时间流逝性的科学基

① 吴国盛.时间的观念[M].北京:中国社会科学出版社,1996:26—27.

础，而且到目前为止，它几乎是唯一的科学基础[①]。”

虽然热力学第二定律在宏观意义上揭示了不可逆性的本质，但令科学家不解的是能够用最基本的物理方程加以描述从而具有可逆性的热力学系统的最基本的物质单元——分子、原子等之间是通过怎样的机制造成系统的变化过程的不可逆性的。由于热力学系统是由数目庞大的分子或原子等微观粒子构成，并且描述分子及原子的运动的物理方程具有时间反演变换不变性，但描述(由分子或原子构成的)热力学系统的物理方程却是时间反演变换对称破缺的，这本身就是矛盾的。热力学理论所描述的系统的变化过程的不可逆性与描述热力学系统的最小物质单元的物理方程具有时间反演变换不变性，两者之间存在的矛盾常被称做热力学佯谬，彻底解决这一佯谬一直是各个时期的物理学家努力奋斗的目标。在协调具有不可逆性变化过程的热力学系统与具有可逆性运动过程的分子、原子等热力学系统最小物质单元之间的矛盾最有影响力的要数玻耳兹曼的统计物理理论，玻耳兹曼将数理统计的方法引入经典力学对热力学系统的最小单元的描述，推导出了著名的玻耳兹曼积分方程，并在此基础上提出了可以用于表征热力学系统变化过程的不可逆性的 H 函数，最终证明 H 函数与热力学系统的态函数熵 S 之间有着深刻的联系，从而将构成热力学系统的最小单元——分子、原子——在系统中分布的无序度与系统的态函数熵 S 联系起来，进一步揭示了热力学系统的态函数熵 S 的微观层次上的含义。由于 H 函数是构成热力学系统的分子、原子等的无序度的衡量指标，因此热力学第二定律的微观本质就有了全新的内容：“热实际上是组成物质的原子和分子的无序运动。因此，系统每一组成部分的机械运动的能量转化为热能，意味着系统大块整体有秩序的运动转化为最小粒子的无序运动，这也就是说，由于粒子的随机运动，使得无序的增加是不可避免的，除非系统受到外界的影响以维持其秩序水平[②]。”

借助玻耳兹曼的 H 函数，热力学第二定律可以重新表述为：如果系统的初始状态是高度有序的，那么无论构成热力学系统的最小物质单元遵循的物理定律是否具有时间对称性，随着时间的流逝热力学系统的无序度必将增加，而相反的过程则完全不可能发生。这样，热力学第二定律将无序度概念与时间的方向性联系起来，而被第二定律所描述的热力学系统的不可逆性通常被科学家称做热力学箭头，箭头的方向是从系统的有序指向系统的无序，并被认为是时间的不可逆性的最重要标志。玻耳兹曼自认为其统计物理学将热力学理论建立在了经典力学的基础之上，但之后物理学家的深入研究发现在玻耳兹曼对热力学系统的最小单元——分

① 刘辽，赵峥，田桂花，张靖仪. 黑洞与时间的性质[M]. 北京：北京大学出版社，2008：224.

② [俄]伊戈尔·诺维科夫. 时间之河[M]. 吴王杰，陆雪莹，闵锐，译. 上海：上海科学技术出版社，2001：201.

子或原子的描述中无意间引入了所谓的分子混沌的假设，假设的基本内容是气体分子或原子在碰撞之前彼此互不相干，只是在碰撞之后才变成相干的，也即是说气体分子或原子之间的碰撞改变了系统的混沌局面，从而气体分子在碰撞前后的运动过程是不对称的。实际上这一假设本身就使得过程具有不可逆性，这就是说玻耳兹曼关于热力学系统变化过程的不可逆性的结论是隐含在分子混沌这一前提中而非直接由经典力学推导出的，从而使得玻耳兹曼企图协调热力学与经典力学之间矛盾的努力受到严重挫折。之后，虽然统计物理学家作了许多尝试，但却始终无法将热力学系统变化过程的不可逆性牢固地建立在分子运动论的基础之上。正因为如此，物理学家对热力学过程的不可逆性的本质依然没有一个确定性的结论，对此，有物理学家认为不可逆性仅仅只是由于人类感官及仪器的局限而造成的错觉，伊·普里戈金在其著作中对这种观点进行了论述："热力学不可逆性只是附加在动力学上的某种近似。引用吉布斯给出的一个例子(Gibbs，1902)：如果我们把一滴黑墨水放到水里搅拌一下，它就会呈灰色。这个过程好像是个不可逆的，但是假使我们能跟随每个分子的话，我们就会看出，在微观世界里，系统保留了不均一性。不可逆性成了由观察者感官的不完善而造成的一种错觉。系统的确保留了不均一性，但不均匀性的规模却已经从初态的宏观尺度变到了终态的微观尺度①。"特别的，"不可逆性是一种错觉的观点曾是很有影响的，许多科学家试图把这种错觉和数学方法(例如会导致不可逆过程的'粗粒'法)联系起来。另一些人怀着同样的目的，尝试过得出宏观观察的条件②。"

也就是说在这些物理学家看来表观上的不可逆性本质上仍然是可逆的，不可逆性仅仅是人们的错觉。而另外一些物理家则坚持不可逆性是自然界一切变化过程的本质特征，从而不可能归结为是由人类知识的缺乏或者观察能力的局限所造成，不可逆性必定与某种更深刻的动力学原理相联系，对此，伊·普里戈金在其著作中也进行了详细阐述："很难想象，我们所观察到的不可逆过程，诸如黏滞、不稳定粒子的衰变等等，会是简单地由于知识的缺乏或观察的不周所造成的错觉。因为即使在简单的力学运动中，我们所知道的初始条件也带有某种近似性，随着时间的增长，对运动未来状态的预言就变得越来越困难。把热力学第二定律用于这样的系统，似乎没有什么意义。与热力学第二定律紧密相关的一些特性，如比热和可压缩性，对于由许多相互作用着的粒子所组成的气体来说是有意义的。但是，当用于简单的力学系统如行星系统时，便无意义了。因此，不可逆性和系统的动力学性

① [比]伊·普里戈金.从存在到演化——自然科学中的时间及复杂性[M].曾庆宏，严士健，马本堃，沈小峰，译.上海：上海科学技术出版社，1986：20—21.

② [比]伊·普里戈金.从存在到演化——自然科学中的时间及复杂性[M].曾庆宏，严士健，马本堃，沈小峰，译.上海：上海科学技术出版社，1986：21.

质一定有某些本质的联系[①]。”依照这种观点，热力学现象的不可逆性本身就是由大量分子、原子等微观粒子构成的热力学系统的最基本的特征，热力学系统的能量被平均分布在大量分子、原子中本身就必然会导致系统具有不可逆性，也即热力学现象的不可逆性不可能建立在热力学系统的最小单元所具有的可逆性过程的基础上，宏观层次上的不可逆性是不需要微观层次上的可逆性解释的，这就意味着时间的方向性不可能从时间的无方向性中获得解释。这种观点显然有其合理性，但需要作进一步详细的说明。

我们知道，经典力学、相对论及量子力学中描述物质变化过程的物理方程之所以具有时间反演变换不变性，主要由于这些方程基本上都是描述单个物体或粒子的方程。而对于像热力学系统中涉及数目如此庞大的粒子的情况，就需要建立数量是几倍粒子个数的力学方程构成的联立方程组，而要真正求解数目如此庞大的方程组的解就连现代巨型超级计算机都无能为力。但是，如果所建立的方程组能够正确反映热力学系统中所有粒子作为一个系统的运动情况，那么热力学系统中所有粒子在空间中分布的均匀性及不可逆性就必定可以从这一方程组的解得到解释，也就是说热力学系统中所有粒子最终分布的不可逆性应该是数目庞大的粒子的集体效应，这种效应应该而且必定能够从数目庞大的、其中每一个变化过程具有可逆性的粒子之间复杂的相互作用中涌现（即凸显）出来，即虽然每一个粒子的运动及变化过程具有可逆性，但是由这样的粒子构成的数目庞大的系统所占据的空间中的整体分布却可以具有不可逆性，也就是说数目庞大的粒子可以在空间中均匀分散（分布），从而同时占据空间中多个位置的特性是单个粒子所没有的性质。由于运动是单个粒子所具有的唯一的运动学性质，因此，在一定空间区域中构成系统的所有粒子的动力学量的均匀分散这一变化过程的不可逆性，作为热力学系统所具有而单个粒子却不具备的全新的性质，从由数目庞大的、其运动具有可逆性的单个粒子构成的系统中涌现了出来。对于复杂的物质系统所具有的性质如何从最简单的、不具有相应性质的物质单元中涌现出来的情况，英国学者 A. 科特内尔在其有关文章中提出了自己的看法：“在某种意义上说大块物质的普通属性大多数是涌现的属性；因为物理系统中唯一的基本属性是基本粒子的运动学属性。……我们经验到的物质世界的其他特性，都是从基本粒子的运动学性质以及我们对该性质的不全面的知识推导出来的。当我们站在一堆火的面前时，火焰中电子的运动引起了我们眼睛或皮肤中其他电子的相应运动，于是我们看到光和感到热。从气体分子运动中涌现了压强、传导、对流等性质。物质的摩擦性质，或者更广义地说，

① ［比］伊·普里戈金.从存在到演化——自然科学中的时间及复杂性［M］.曾庆宏，严士健，马本堃，沈小峰，译.上海：上海科学技术出版社，1986：21.

和热力学不可逆性有关的性质，不存在于基本粒子的层次上。它们完全来自下面的事实，即我们能识别和描述大群粒子的某些总体运动学状态——在这种状态中，个体分担共同的运动或某种其他相同的运动学特征——远比我们能够识别和描述任何缺少这种明显特征的很大一类无序态更为简单。于是我们在这里碰到了复合系统最重要的特征：物质的某些新属性从我们对构成它的粒子的个体运动的无知中涌现出来①。”

也就是说所有宏观物质现象所具有的特性都是涌现出来的而不是造成宏观现象的原子、分子等微观粒子原本就具有的。其实单一个体所没有的性质能够在数目庞大的同类个体之间的复杂的相互作用之中涌现出来的实例非常之多，从而与这些更复杂的现象相比，热力学系统的不可逆性理解起来应该更加容易。如由牛顿力学可知，任何单个物体的运动都具有可逆性并且运动的轨迹及在空间中某一点上出现的时刻都具有确定性，但对于相互之间具有引力作用的三个星体而言，每一个星体在空间中某一点上出现的时刻则具有不确定性。又如任何单一分子的运动及变化表现出的都是完全的随机性从而根本不可能具有任何生命的迹象，但众多不同的分子之间借助包括物理的和化学的等在内的异常复杂的相互作用却导致了完全有序的、自组织的生命现象涌现出来，也就是说自组织的生命现象完全是而且可以从其变化过程具有可逆性的众多没有生命迹象的单个分子的复杂的相互作用中涌现出来。再如科学的观察证明，每一只蚂蚁（或者蜜蜂）的个体行为都具有相当的随机性，但在数目庞大的蚂蚁群落中蚁后的生物信息素的作用下蚂蚁个体之间分工明确、相互协作，从而使得蚂蚁群落的集体行为能够表现出惊人的智慧，也就是说智慧完全可以从蚂蚁群落众多简单个体的随机行为中涌现出来。又如单个人类个体一旦脱离人类社会，就成为非社会性的人，这样的人每天只能为生存而忙碌，其唯一目的就是生存，对他而言未来除了一种可能性之外没有其他可能性，那就是像所有其他动物一样臣服于环境并接受环境的摆布；而由众多人类个体构成的人类社会则完全不同，在人类社会中每一个个体为了更好地生存都会充分展示其聪明才智，为人类社会的发展贡献智慧，对人类社会中的每一个个体而言，他人就是其感官及智慧的延伸，这样，众多不同的个人的思维模式就可以造就永远处于不断进化中的高度文明的社会，也就是说高度发展的、以实现每一个人类个体自身价值为目的的人类文明从以生存作为其唯一目的的人类个体中涌现出来，在人类社会中每一个人类个体都具有无限的可能性。我们还可以列举出更多类似的实例，而所有这一切都充分表明复杂系统的本质特征都是从简单个体之间的相互作

① ［英］罗纳德·邓肯，米兰达·维斯登·司密斯．科学的未知世界——复杂系统的涌现属性［M］．上海：上海科学技术出版社，1985：136．

用中涌现出来的，从而体现了量变引起质变的唯物辩证法的原理。当然，由于热力学系统的复杂性远超出人类的想象，即使是借助人类强大的数学工具要真正实现对系统的精确描述都几乎是不可能的，而科学家对于系统的复杂性质是如何从其基本单元的相互作用中涌现出来的这一问题的研究还有很长的路要走，因此物理学家们对热力学系统变化过程本质上是否具有可逆性的争论可能还将持续下去。

以上我们从物理学的传统视角对热力学箭头及其本质进行了详细的讨论，但除了热力学时间箭头之外，物理学家认为还应该存在以下几种时间箭头：因果箭头、电磁学箭头、宇宙学箭头、心理学箭头等，并且认为所有这几种时间箭头都可以归结为热力学的时间箭头，从而包括热力学时间箭头在内的这几种时间箭头均指向同一个方向，下面的讨论将证明这一观点。

1. 因果箭头

我们知道，对于自然发生的变化过程而言，“原因”总发生在“结果”之前，即任何一个“结果”的出现总是由发生在之前的“原因”导致的，这就是所谓的存在因果关系的事件之间在发生意义上的时间顺序关系（也可称作因果顺序关系），由于这种关系的方向是由原因指向结果，也被称作因果箭头，通常人们普遍认为所说的时间箭头是由因果箭头决定的，前苏联哲学家 A. M. 莫斯杰巴宁柯在其著作中对此进行了简单论述：“在这类想象的基础上，产生出一种因果性时间理论，按照这种理论，时间的秩序可以从因果的秩序引出。根据因果性时间理论，因果关系是时间关系的基础，并制约着时间关系。并且假定，世界的因果关系乃是了解我们的时间的本质和特性的钥匙[①]。”根据热力学第二定律，由于任何热力学系统的熵总是随时间的流逝而增大的，因此与稍早的时间对应的系统的熵必定比与稍晚的时间对应的系统的熵要小，而“原因”显然是在时间上先发生的事件从而对应于较小的熵，“结果”则是在时间上后发生的事件从而对应于较大的熵，也即因果顺序关系与熵增原理两者之间有必然的联系，确切地说，按因果顺序关系的方向发生的变化过程必定是熵增大的过程。但对于自然发生的物质变化过程的逆过程而言，“原因”与“结果”出现的时间顺序刚好颠倒过来，即“结果”发生在“原因”之前从而意味着过去出现的“结果”由未来出现的“原因”导致（“果”在前“因”在后），而这种“原因”与“结果”在时间上出现的顺序恰恰违反了“原因”与“结果”之间的时间顺序关系，这种时间顺序关系显然对应于系统的熵减小的过程，从而违反了热力学第二定律，因此在现实中是不可能发生的。

例如，鸡蛋从桌面上落到地面上后与地面发生碰撞后鸡蛋被打碎这一过程，将

① ［苏］A. M. 莫斯杰巴宁柯. 宏观世界、巨大世界和微观世界的空间和时间[M]. 王鹏令，陈道馥，译. 北京：中国社会科学出版社，1985：52.

这一过程进行分解即:鸡蛋在桌面上→鸡蛋离开桌面→鸡蛋开始下落→鸡蛋落到地面上→鸡蛋与地面发生接触→鸡蛋与地面发生碰撞→鸡蛋破碎。显然,"鸡蛋在桌面上"可以看做是原因,而"鸡蛋破碎"可以看做是结果,即原因在前、结果在后,符合因果顺序关系,另外由于"鸡蛋在桌面上"时的熵小于"鸡蛋破碎"时的熵,因此同样符合热力学第二定律;上述过程的逆过程即散落在地上的碎鸡蛋不知什么原因自动复原成一个完整的鸡蛋而后自动从地面上弹起并跳到桌子上,将这一过程进行分解则有:鸡蛋破碎→鸡蛋复原→鸡蛋与地面发生弹性碰撞→鸡蛋与地面发生接触→鸡蛋由地面向上弹起→鸡蛋回到桌面上→鸡蛋在桌面上。显然,在此过程中"鸡蛋破碎"这一结果在时间上先于"鸡蛋在桌面上"这一原因而发生,从而结果在前、原因在后,这显然违反因果顺序关系,而"鸡蛋破碎"时鸡蛋的熵显然大于"鸡蛋在桌面上"时鸡蛋的熵,并且已经碎了的鸡蛋自动复原这一过程也是鸡蛋的熵减小的过程,显然违反了热力学第二定律,在现实中是不可能发生的事,也就是说违反因果顺序关系的过程同样是不可能发生的;而落到地面上的鸡蛋因受到地面的冲击力被打碎的现象显然是熵增加的过程,完全符合热力学第二定律,即因果顺序关系与热力学时间箭头一致。

又如,在一个密闭的长方体容器的中间装有一块隔板,将容器分为左右两个部分,开始时容器中的气体都集中在右半部分,当我们将容器中的隔板抽掉后,集中在容器右半部分的气体将逐渐向容器的左半部分扩散,直至容器中的气体在容器中均匀分布,我们将这一过程进行分解:容器中的气体被隔板隔在右半部分→抽掉隔板→隔在容器右半部分的气体失去阻隔→气体向容器的左半部分扩散→气体充满整个容器。显然,在这一过程中"容器中的气体被隔板隔在右半部分"可以看做是原因,而"气体充满整个容器"可以看做是结果,即原因在前、结果在后符合因果顺序关系,而"容器中的气体被隔板隔在右半部分"时的熵小,"气体充满整个容器"时的熵大,这种现象符合热力学第二定律。而相反的过程则意味着容器中的气体逐渐向容器的右半部分聚拢并最终全部聚集在容器的右半部分最后隔板被插好,将这一过程进行分解:气体充满整个容器→容器左半部分的气体向容器右半部分聚拢→气体全部聚集在容器的右半部分→隔板被插上→容器中的气体被隔板隔在右半部分。显然,在此过程中"气体充满整个容器"这一结果在时间上先于"容器中的气体被隔板隔在右半部分"这一原因而发生,从而结果在前、原因在后,这显然违反因果顺序关系,而"气体充满整个容器"时的熵大,"容器中的气体被隔板隔在右半部分"时的熵小,这明显违反了热力学第二定律,因此是不可能发生的,也就是说违反因果顺序关系的过程也是不可能发生的,从而因果顺序关系可以归结为热力学第二定律的作用,并与热力学时间箭头完全一致。我们还可以列举出许多其他的相关例子,所有这些实例都能够说明结果发生在原因之前的变化过程,即熵减小

的过程，从而是违反热力学第二定律的，最终我们获得的结论是：结果发生在原因之前的变化过程是不可能发生的，从而因果顺序关系的方向总是从过去到现在再到未来，这一时间的方向与热力学时间箭头的方向是完全一致的。

2. **电磁学箭头**

我们知道，真空中的麦克斯韦电磁场方程组有两个解：一个解用于描述包括可见光波在内的从波源处向周围空间辐射的推迟波（按各种物理教材中的解释，推迟波是在正向流逝的时间中由现在向未来传播的波），另一个解用于描述由周围空间向波源汇聚的超前波（按物理教材中的解释，超前波是在逆向流逝的时间中由现在向过去传播的波），由于麦克斯韦电磁场方程具有时间反演变换不变性，因此这两个解显然都是麦克斯韦方程组所允许的，也就是说，对于任何一列电磁波而言，麦克斯韦方程不能够告诉我们这列波是在它被发射之前到达还是在发射之后达到，从这个意义上说，麦克斯韦电磁场方程并不存在时间箭头。一方面由于麦克斯韦方程组的超前解所描述的电磁波的传播方式与我们关于波的传播方式的常识观念相背离，另一方面由于所有相关的物理实验从未发现超前电磁波，并且人们认为这样的波根本就不可能存在，因此，麦克斯韦电磁场方程的超前解通常被认为无意义而被舍去，这样就出现了由推迟电磁波规定的时间箭头，而由于推迟波及超前波两者均是麦克斯韦电磁场方程允许的，因此现实选择推迟波的理由显然超越了麦克斯韦电磁理论，从而在麦克斯韦电磁理论中是无法得到解释的。通常的理解是推迟波从其波源向周围空间扩散的过程是电磁熵增大的过程，而如果要使得辐射到宇宙空间中并被分布在空间中的物质所吸收的电磁波逆转其过程并各自汇聚到其波源所在的空间点上，这种变化过程显然违反了热力学第二定律，因而是不可能发生的。因为辐射到宇宙空间中并被宇宙中的物质吸收后的电磁波的能量被逐渐平均分散到宇宙空间中的微观粒子上的过程是熵增加的过程，而要将这些被吸收的能量从相关的微观粒子中分离出来则是熵减小的过程；退一步说，由于电磁波的能量辐射到周围空间中的过程是电磁波的能量平均分布到空间中，从而是电磁熵增大的过程，即使上述这些辐射到周围空间并被围观粒子吸收的能量被分离出来，而要使这些被分离出来的电磁波再重新汇聚到其辐射源上，就必须使这些波步调一致的协同行动，这样的变化同样是一个熵减小的过程，从而也是不可能发生的。另外，从电磁波的产生到电磁波逐渐向远离波源的空间传播的过程，特别是从时间流逝的方向上看，波源的产生在前而波场的出现在后，波场显然是由波源产生的，从而波源是原因而波场是结果，两者之间显然符合因果顺序关系，而由于违反因果顺序关系的过程是不可能发生的，从而由波场到波源传播的所谓超前电磁波是不可能发生的，这就意味着电磁波只能从其波源向周围空间传播的过程是自然发生的过程，与之相反的过程是不可能发生的，从而只有麦克斯韦方程的推迟解才是自然

界中可以自然发生的过程，由于这一过程是熵不断增大的过程，从而与热力学第二定律完全一致，这就是说电磁学时间箭头与热力学时间箭头指向相同的时间方向。

3. **宇宙学箭头**

我们知道，描述宇宙演化规律的最基本的理论是广义相对论，广义相对论中的爱因斯坦引力场方程具有时间反演变换不变性，但从广义相对论导出的宇宙的弗里德曼模型却选择了唯一的一个宇宙解——宇宙膨胀解，宇宙膨胀解这一宇宙演化模型得到了宇宙中所有星系的谱线红移、宇宙的 2.7K 微波背景辐射以及元素丰度等观测数据的支持。宇宙膨胀解的存在暗示了宇宙是从空间中的一个没有大小的点经过无与伦比的大爆炸产生出来的，而且宇宙中的一切物质都得益于这次大爆炸。宇宙从大爆炸中诞生后经过急速的膨胀体积迅速扩大，随着宇宙空间范围的扩大，宇宙产生之初的能量以光的形式迅速向宇宙空间的各个方向辐射出去，同时宇宙空间的温度持续下降，构成宇宙中所有星体物质的基本粒子产生出来，这些过程就是熵增大的过程。随着时间的流逝，在强相互作用、弱相互作用及电磁相互作用的作用下，较重的粒子以及分子等产生出来，这些过程同样伴随着光子的辐射以及熵的增大，随后在万有引力作用下，各种原子、分子等聚集成巨大的物质团块，其中部分物质团块最终会形成恒星，恒星形成后在万有引力作用下会不断收缩而发生核聚变反应，从而产生出光子、中微子等粒子向宇宙空间辐射，恒星的熵伴随着辐射而持续增大，这同样是一个熵不断增大的过程，所有这一切都表明，宇宙在发生大爆炸后不断膨胀这一演化过程显然是单向的、不可逆的。这也就意味着描述宇宙起源于大爆炸的宇宙膨胀解具有方向性。可见，所谓宇宙学的时间箭头是宇宙发生大爆炸后由空间中的一个奇点产生出来的，宇宙在刚诞生时处于高度有序的低熵状态，之后其体积不断膨胀，在此过程中构成宇宙星体的微观物质产生出来，随后恒星及行星也产生出来，再后来宇宙中的行星地球出现了生命现象。虽然在宇宙的局部出现高度有序的生命体，但随着时间的流逝，宇宙在不断膨胀，其熵也在不断增大，这就意味着宇宙的膨胀本身构成一个箭头，这一箭头指向宇宙由小变大的方向并且关联着宇宙的熵由小变大的方向，从而宇宙学箭头与热力学箭头的指向完全一致。这里的解释显然将宇宙学箭头归结为热力学箭头。而依据宇宙大爆炸学说的结论，宇宙中的万物都是在宇宙大爆炸发生后，在宇宙的不断膨胀过程中，宇宙中物质粒子所在环境的温度不断下降从而相互之间的吸引力大于排斥力致使更大的物质粒子逐渐形成。因此宇宙中的所有现象都应归结为宇宙的膨胀，特别是热力学箭头和电磁学箭头都应该归结为宇宙学箭头。但是，上面介绍的几种所谓的时间箭头真的决定着时间的方向吗？由于没有确凿的证据能够给予证明，对此，前苏联哲学家 A. M. 莫斯杰巴宁柯在其著作中表示怀疑："在考察这种观点时所产生的问题是：为什么所考察的这三种'时间之矢'似乎是彼此一致的？更

合乎情理地不是它们之中的某一个比其余两个更根本，而是它们之中的每一个都这样或那样地确定着我们周围世界的时间方向。正像空间的三维性问题一样，时间的单向性也有许多根据，这本身就证明了逆向推理的必要性。可见，不是时间的单向性从观察到的三类现象（不可逆的热力学过程、电磁过程和宇宙膨胀）中引申出来，相反地倒是在经验中所观察到的这些过程的非对称性，由统一的根源——时间的单方向所决定。而这种特性本身和先前一样，仍然是非常费解和没有得到论证的[①]。"

4. **心理学箭头**

所谓心理学箭头是人类经验中最显著的一个时间箭头，其方向是从人类对事件的感知到对这些事件的记忆。心理学箭头完全取决于人类记忆的"过去性"特征，正是因为有了记忆，我们才总是感觉到包括我们自己在内的所有事物总是从过去走到现在再走向未来，因此我们总是记得过去而不是记得将来。要理解心理学时间箭头的意义，就必须首先搞清人类的记忆产生的过程，所谓人类的记忆是指外界环境发生的事件通过人的感觉神经产生的电信号经由神经通道传输到大脑中并在大脑皮层的细胞中所产生的相应的物质形态的变化，这种变化投射到人的意识中即成为与外界环境所发生的事件相对应的影像。显然，这里所说的"环境的作用"是原因，而"（人的）感觉神经（因环境的作用）产生电信号"是结果，对上述过程而言，两者之间符合原因在前、结果在后的时间顺序关系；另外，"环境的作用"对应于在时间上先发生的事件从而必定具有较小的熵，而"感觉神经产生电信号"对应于在时间上后发生的事件从而必定具有较大的熵，因此"环境的作用"导致"感觉神经产生电信号"这一过程必然与熵增原理完全一致。假如未来环境的作用能够对当前人的感觉神经产生作用，即当"感觉神经产生电信号"时"环境的作用"还未发生，更确切地说我们的大脑在某一时刻突然产生"感觉神经产生电信号"，经过一定时间间隔后我们的感官才感觉到引起这一电信号的"环境的作用"，这一过程显然违反了原因发生在结果之前的时间顺序关系，而从上面的讨论我们知道因果顺序关系与热力学箭头是完全一致的，因此违反因果顺序关系的过程，同样也是违反热力学第二定律，从而是不可能发生的，即未来的事件不可能对人类的感官产生任何作用。而我们经历过的事件总是按从未来到现在再到过去的顺序发生的，从而过去的事件必定是我们先要经历的，而未来的事件是我们在以后的时间将要经历的，这也就意味着我们只能首先记住过去的事件而不可能对未来的事件产生记忆，从而我们的记忆总是从过去指向未来，我们总是而且只能对过去经历过的而非还未

① ［苏］A. M. 莫斯杰巴宁柯. 宏观世界、巨大世界和微观世界的空间和时间［M］. 王鹏令，陈道馥，译. 北京：中国社会科学出版社，1985：62.

发生的未来的事件产生记忆。而热力学的时间箭头也是从过去指向未来，因此心理学时间箭头与热力学时间箭头是完全一致的。也有学者提出如下理由解释心理学箭头与热力学箭头之间的一致性：人的大脑为了记住某件事情，脑细胞之间的物理及化学形式的联络会从一种无序的状态转变为一种有序的状态（或者从一种有序状态转变为另一种有序的状态），而为了使我们的大脑维持这种状态从而保持正确的记忆，人的大脑必须消耗能量。这样，处于人的大脑系统之外周围环境的无序度便会因此增大，并且相应的增加值总是大于我们大脑的有序度的增加值，也就是说我们从周围环境无序度增加的过程中记住了某件事情，或者说我们的大脑形成正确的记忆是以周围环境无序度的增大为代价的，确切地说，记忆形成的过程是：周围环境中发生的事件→大脑神经细胞产生电信号→大脑形成有序状态→周围环境的无序度增加。显然，脑细胞在接收到电信号的刺激之前的有序度较接收到电信号刺激并形成相应的记忆之后的有序度要小，相应的周围环境的有序度的变化则与之相反，因此，周围环境发生的事件必定在脑细胞形成相应的记忆之前而非之后，从而我们记住的事情必定总是发生在过去。这一解释同样可以得到心理学时间箭头与热力学时间箭头是完全一致的结论。

除了上面讨论的几种时间箭头之外，量子物理学家普遍认为还存在量子力学时间箭头，这是由仪器或人的观察对量子系统进行测量所造成的系统波函数的瞬间坍缩而导致的量子系统波函数的不对称变化，但波函数因仪器或人的观察所导致的坍缩会导致一些难以解决的悖论（如薛定谔猫悖论），因此这种观点存在很大的争议，在此就不再作进一步的讨论。这里我们简单讨论了当今物理学公认的几种能够代表时间流逝方向的重要的"时间箭头"，通过对这几种"时间箭头"的讨论可见，所谓的热力学时间箭头是各种常见的时间箭头中最基本的时间箭头，而所有其他几种时间箭头都可以归结为热力学时间箭头。实际上有研究表明：因果箭头也可以作为将其他几种箭头都归结其上的最基本的时间箭头，因为讨论方式与上述基本相同，我们在此就不赘述。

以上我们对热力学系统变化过程的不可逆性与时间的方向性之间的关系进行了详细的讨论，在讨论过程中虽然有提到说"热力学第二定律决定了时间流逝的方向"、"熵增大的方向表征了时间流逝的方向即时间箭头的方向"等物理学中经常提到的被人们普遍接受的传统观点，但是迄今为止的所有相关的物理学文献中对这些观点都没有给出过任何严格的论证，而仅仅只是不厌其烦的大量的文字性说明，但是这些说明却被人们作为真理逐渐接受下来，实际上在讨论中涉及的熵增大的方向与时间流逝的方向之间所存在的联系都是物理学家们直觉上作出的结论，并没有更多理论上的依据。以下英国物理学家保罗·戴维斯借助具体的热力学现象引入所谓的时间箭头的具体实例就可以说明这一点："为了证明时间的不对称，时

间不必从过去流向未来。要看个究竟，想象一部影片，其过程具有不可逆特征：蛋掉到地板上，碎了。假设胶卷被剪辑成一组组镜头，而这些镜头又被弄乱了。面对把镜头重新排序的乏味任务，最终，大多数人大约会毫不费力地把胶卷恢复到其原来的顺序。我们猜想有关完整的蛋的那些镜头靠前，而破碎的蛋壳的那些镜头靠后。细看之下，顺序的不对称是显而易见的；实际上，根本没有必要放映这部影片，并看看事件按先后顺序"发展"来确定时间之箭。此箭与电影无关，它是全部镜头的结构属性。仅仅把全部镜头按顺序堆放起来，时间之箭，或者说不对称性就已在那儿；把全部镜头再次剪辑成电影并在放映机中放映，时间之箭同样还在那儿[①]。"在这一实例中我们看到的仅仅只是随着时间的流逝蛋从完好到破碎的整个变化过程的不对称性，根本没有看到时间本身的单向性。特别是当我们将胶片倒过来放映时，看到的虽然是一个完全相反的过程，但不要忘记这仍然是在正向流逝的时间中进行的，就是说即使相反的过程实际发生了，那也只是在正向流逝的时间中进行的，可见，从完整的蛋到破碎的蛋的变化过程不可逆转的方向性仅仅只是与时间流逝的方向重合，而根本无法代表或决定时间流逝的方向。因此，这并不是时间箭头存在的证明，而是变化过程的单向性的实例。当然，物理学家在思考时间箭头的问题时也不仅仅是通过举例说明的方式，同样也进行了理论方面的探讨，但所有这些努力都表明时间的方向性不可能由各种变化过程的单向性所决定，正如前苏联哲学家 A. M. 莫斯杰巴宁柯在其著作中所说："时间的秩序和方向的理论证明问题，在学者们中间引起了许多争论。时间的瞬间为什么是有序的，就像直线上的点一样？问什么时间的秩序是非对称的，并且时间老是从过去经过现在流向将来？对于这些问题，直到目前为止，尚未得到一致的和最终的答案[②]。"虽然这是莫斯杰巴宁柯在距今近 20 年前对当时学术界关于时间的方向性问题研究现状的描述，但迄今为止这些问题仍然没有得到彻底解决。

其实，早在热力学出现之前的十七、十八世纪，法国数学家莱布尼兹及德国哲学家康德就注意到，原因发生的时间总是先于结果这一事实，事件的因果秩序与时间秩序都指向完全相同的方向，并据此提出了所谓的因果性时间理论。"按照这种理论，时间的秩序可以从因果的秩序引出。根据因果性时间理论，因果关系是时间关系的基础，并制约着时间关系[③]。"莱布尼兹及康德关于因果秩序与时间秩序之间关系的论述为因果性时间理论奠定了基础。此后的二十世纪，物理学家 H. 莱

---

① [英]保罗·戴维斯.关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M].长春：吉林人民出版社，2002：359—360.

② [苏]A. M. 莫斯杰巴宁柯.宏观世界、巨大世界和微观世界的空间和时间[M].王鹏令，陈道馥，译.北京：中国社会科学出版社，1985：51.

③ [苏]A. M. 莫斯杰巴宁柯.宏观世界、巨大世界和微观世界的空间和时间[M].王鹏令，陈道馥，译.北京：中国社会科学出版社，1985：52.

辛巴赫从事件的时间秩序的定义及相应的推理出发也对因果性时间理论进行了研究，下面是前苏联哲学家 A. M. 莫斯杰巴宁柯对莱辛巴赫所进行的研究的简单介绍："如果 E_2 是 E_1 的结果，那么，E_2 晚于 E_1 而出现。但是，这里马上就产生一个严重的困难：若完全不借助于时间的顺序性概念，怎样区分原因和结果呢？为了克服这一困难，莱辛巴赫提出一种打记号的方法。如果 E_1 是 E_2 的原因，那么 E_1 的微小变化（记号）必将引起 E_2 的一定变化，然而 E_2 的微小变化却不引起 E_1 的任何变化。我们在实验中观察到的只有下列组合：E_1E_2、$E'_1E'_2$、$E_1E'_2$，而永远不会观察到 E'_1E_2 这种组合。让我们从点 A 向点 B 抛出石子。如果在点 A 用粉笔给石子画上记号，那么，它在到达 B 时将带着同一记号。如果只是在石子到达点 B 时才给它画记号，那么，它在点 A 时自然没有记号[①]。"实际上在上述 H. 莱辛巴赫所作的研究中采用对石子画记号的方式来定义石子从点 A 到达点 B 之间的因果关系的方法中本身就隐含了"早"、"晚"等与时间秩序相关的、需要用时间秩序进行定义的概念，即如果在 B 点发现带有记号的石子，那么我们可以认为这一记号是早先在 A 点已经画好的记号；而在 B 点才给石子画记号并说它在 A 点自然没有记号这说法中本身就含有石子在 A 点的出现早于在 B 点的出现，从而某一时刻在石子上所画的记号肯定不能在早先出现这一前提，这一点"正如 J. 乌依德罗乌和 A. 格留鲍姆所说，这种推理犯了赤裸裸的逻辑循环的错误：在定义因果秩序的时候，暗暗地利用了正是那个需要被引出的时间秩序概念[②]。"A. 格留鲍姆除了分析指正 H. 莱辛巴赫在推理中存在的问题之外，还提出了自己关于因果时间理论的新观点。不过，A. 格留鲍姆的研究结果表明，"要想完全不用时间标准，只用语言来区分原因和结果，看来是不可能做到的。……在我们周围的世界中，时间秩序在某种意义上是因果秩序的前提，并且具有更根本的地位[③]。"实际上描述基本物理过程的方程具有时间反演变换对称性这一事实同样说明因果秩序不可能决定时间的秩序及方向，而根据我们在第 1 章 1.4 节的结论，由于任何一个变化过程与其逆过程都是在正向流逝的时间中发生的，而在变化过程的逆过程中因果秩序发生了颠倒，因此因果秩序的任何变化都不会对时间的秩序及方向产生影响。可见，由因果秩序的存在性不可能逻辑的推论出时间具有秩序及方向，也就是说事件的因果秩序与时间秩序都指向完全相同的方向这事纯属偶然。

在热力学理论建立特别是热力学第二定律被提出来以后，物理学家们又试图

---

① [苏]A. M. 莫斯杰巴宁柯. 宏观世界、巨大世界和微观世界的空间和时间[M]. 王鹏令，陈道馥，译. 北京：中国社会科学出版社，1985：52.

② [苏]A. M. 莫斯杰巴宁柯. 宏观世界、巨大世界和微观世界的空间和时间[M]. 王鹏令，陈道馥，译. 北京：中国社会科学出版社，1985：53.

③ [苏]A. M. 莫斯杰巴宁柯. 宏观世界、巨大世界和微观世界的空间和时间[M]. 王鹏令，陈道馥，译. 北京：中国社会科学出版社，1985：56.

从热力学变化过程的不可逆性推论出时间的单向性，迄今为止许多物理学家对这些问题都有过深入的思考。前苏联哲学家 A. M. 莫斯杰巴宁柯在其著作中对物理学家们的相关工作进行了概括性的总结："试图从熵增加定律引出时间的单向性(这个思想是波尔兹曼首先提出的)，乃是对这种性质的理论证明问题的一种最合乎自然的观点。事实上，环绕着我们的一切宏观过程，严格地讲都是不可逆的，即不能在相反的方向上进行。假设我们把一小杯茶水中的糖搅匀，糖在溶解，均匀地分布于液体的全部体积中。但期望实现相反的过程则是荒唐的：溶剂和溶质的自然分离，只有在倒行的电影胶片中才是可能的。有机体的衰老只是我们在日常生活中所碰到的无数不可逆过程的一个例子。这些过程进行的方向，以一个特殊的物理量——熵来表征。假设有一个封闭的，即和世界其余部分相隔绝的系统，在其中进行着各种不可逆的过程，那么，该系统的熵只能增加，这种增加证明它从比较有秩序的状态过渡到不太有秩序的、但可能性更大的状态。但是，认为我们的时间方向就是孤立系统熵增加的方向的观点，立刻又遇到了严重的困难。封闭系统的熵增高定律具有统计的性质，并且只有在对包含大量原子和分子的各种宏观系统所进行的平均过程中才得到的。所观察的系统尺度越小，对这条规律的偶然偏离(涨落)就越大。此外，在充分大的时间间隔内，对于巨大客体来说，这种偏离也是可能的。洛什米特、采尔麦勒和彭加勒表述过所谓"可逆性佯谬"。假设有一个孤立系统，其熵值比较低，由此决定了该系统的熵从一开始就将增加，并必将达到某一平衡值。但是随后，经过一个足够长的时间间隔，熵可能重新降低到初始的数值。更何况系统向低熵的过渡，平均来说将如此经常地发生，即与系统向高熵的过渡一样。这似乎是借助于熵增加定律取消了时间的确定方向[①]。"虽然众多物理学家对热力学第二定律与时间的单向性之间的关系有过大量的论述，但这并不意味着时间具有方向性是确定无疑的结论，正如 A. M. 莫斯杰巴宁柯在其著作中对关于热力学第二定律与时间的方向性之间的关系的各种论述所作出的结论："不管时间的方向和熵增高定律相联系的结论多么重要，也不能把它看做时间单向性之绝对无争议的理论证明。为了从理论上证明时间的单向性，应当从某种根本的自然规律中把它引申出来[②]。"实际上自热力学第二定律提出后，物理学家们对热力学系统的熵总是随时间不断增大，从而系统的变化过程具有单向性这一事实是否意味着时间的单向性这一问题一直处于不断地争论过程中，这就说明时间的方向性问题就根本没有得到彻底解决，也就是说即使是被物理学家公认为决定了时间具

① [苏]A. M. 莫斯杰巴宁柯. 宏观世界、巨大世界和微观世界的空间和时间[M]. 王鹏令，陈道馥，译. 北京：中国社会科学出版社，1985：58.

② [苏]A. M. 莫斯杰巴宁柯. 宏观世界、巨大世界和微观世界的空间和时间[M]. 王鹏令，陈道馥，译. 北京：中国社会科学出版社，1985：60.

有单一方向性特性的热力学第二定律实际上也没有为时间的单向性提供真正可靠的证明。另外，在前面的讨论中我们提到过其他几个变化过程的箭头同样可以归结为因果箭头，而因果箭头被证明无法决定时间的秩序及方向，由此可以说明热力学箭头同样也无法决定时间的秩序及方向，即时间的秩序及方向与热力学箭头无关。

此外，还有物理学家试图从电磁学箭头存在的角度出发对时间的单向性进行证明，但没有实际上也不可能实现。正如哲学家 A. M. 莫斯杰巴宁柯在其著作中所说："但即使在这里，也产生了实质性的困难。众所周知，麦克斯韦的电磁理论本身并不禁止超波，超波的'存在'在理论上和迟波具有同等权利。从理论上看，两者是完全平权的。在我们的世界上没有超波，这只不过是一个经验事实，它毕竟不能成为但方向性的理论根据，它几乎只是为单方向性提供了一个间接的实验证据。美国物理学家维勒和费因曼建立了这样一种动力学的方案，这个方案不抛弃超波，而把它们看做是完全实在的。不过，在考虑到辐射电荷与宇宙中所有其他电荷的相互作用的情况下，就产生在试验中所出现的那种通常的延迟效应。一看就可以明白，这一成果到底给出了所要寻找的时间单向性的证明。但是很遗憾，事情并非如此。当把维勒和费因曼的全部计算中的时间符号变成相反的时候，就产生纯粹的超前效应。由此得出结论：理论本身并不禁止纯粹超前效应和相反的时间方向的存在。只不过在我们的世界上观察不到这些效应罢了[①]。"从以上 A. M. 莫斯杰巴宁柯对物理学家维勒和费因曼就电磁波所进行的传统意义上的时间反演变换操作及其成果所作的概括性介绍可见，该实例虽然在传统意义上可以看做是对电磁学箭头与时间箭头之间关系的否定性结论的有力证据，但与前面第 1 章 1.4 节中提出的时间反演变换新的操作定义对麦克斯韦电磁场方程的推迟波和超前波的解释还是有很大的不同，从我们上面提出的时间反演变换的操作性定义看来，所谓的电磁波的推迟波及超前波实际上都是在正向流逝的时间中的在空间中传播的波，也就是说超前波的存在并非意味着这种波是在反向流逝的时间中从现在向未来传播的电磁波，更不意味着时间可以反向。

历史上许多物理学家先后从因果箭头、热力学箭头、电磁学箭头甚至是宇宙学箭头等与所谓时间箭头之间的关系进行了详尽地考察，但结果都表明时间箭头的存在不可能从几种实际存在的变化过程的箭头中得到证明，正如 A. M. 莫斯杰巴宁柯所说："不是时间的单向性从观察到的三类现象（不可逆的热学过程、电磁过程和宇宙膨胀）中引申出来，相反地倒是在经验中所观察到的这些过程的非对称性，

---

① ［苏］A. M. 莫斯杰巴宁柯. 宏观世界、巨大世界和微观世界的空间和时间［M］. 王鹏令，陈道馥，译. 北京：中国社会科学出版社，1985：60—61.

由统一的根源——时间的单向性所决定。而这种特性本身和先前一样，仍然是非常费解和没有得到论证的[①]。”这与我们在第1章1.4节的结论完全一致。实际上由我们前面的讨论可知，时间的方向不仅无法由物质变化过程的单向性所决定，甚至与之没有直接关系。

通过前面第1章1.4节的讨论我们知道，对所有描述物质变化过程的物理方程进行时间反演变换的结果只能导致物质变化过程的逆转，而不会导致时间的逆转（倒流），即在各种物理学理论中讨论过的包括所有可逆的或不可逆的物质变化过程在内的原变化过程与其逆过程（时间反演过程）都是在正向流逝的时间中发生的，也就是说物质变化过程只能向一个确定的方向发生的所谓方向性，并非因为受到时间的方向性的制约而产生的，单向性是物质的变化过程本身就具有的性质。比如对麦克斯韦电磁场方程的其中一个解（如延迟波）进行时间反演变换就能得到方程的另外一个解（如超前波），而麦克斯韦电磁场方程的这两个解对应的电磁波均是在正向流逝的时间中传播的，而完全不像物理学家惠勒·费因曼所理解的电磁场方程的其中一个解超前波是在逆向流逝的时间中传播的，就如物质的变化过程与其倒放的影像均是在正向流逝的时间中发生的一样。描述物质变化过程的基本物理方程具有时间反演变换不变性并非意味着对这些过程而言过去与未来是对称的，也不意味在对相应的物理方程进行时间反演变换时必然发生了时间倒流，而仅仅意味着这些变化过程具有可逆性，即原变化过程的逆过程同样是可以真实发生的变化过程。由第1章1.4节的讨论可知，热力学第二定律不允许任何热力学系统的熵减小过程的发生并不意味限制了时间的反向，即热力学系统的变化过程关于时间反演变换的对称破缺不意味着在相应的变化过程中限制了时间倒流情况的发生，也不意味着在这些变化过程中时间因此具有了方向性或者出现了所谓的“时间箭头”（即时间本身的非对称性），而仅仅只能说明热力学系统的变化过程具有不可逆性，从而不允许系统的变化过程向与之相反的、熵减小的方向发生的事实（即热力学系统的变化过程在时间中的非对称性），两者具有明显的不同。可见，在物理学中将热力学第二定理所界定的变化过程的不可逆性或方向性完全对应于时间的方向性是将变化过程与时间相混淆的又一个实例。从而我们可以下结论说：时间的方向性与物质变化过程的方向性之间没有任何关系，也就是说通常所说的时间的非对称性与变化过程及其逆过程之间的非对称性有本质的不同，对于时间本身的非对称性及物质的变化过程与其逆过程（在时间中）的非对称性之间的区别，英国哲学家胡·普赖斯在其著作中作过形象生动的比喻：

---

① ［苏］A. M. 莫斯杰巴宁柯. 宏观世界、巨大世界和微观世界的空间和时间[M]. 王鹏令，陈道馥，译. 北京：中国社会科学出版社，1985：62.

"设想在一条长而窄的桌子放置事物，桌上的内容可以很不相同，例如一边是荤菜，另一边是素菜，一边有切牛排的刀，另一边没有，所有的叉子则都放在桌子同一边等等。这就在桌子上形成了非对称性。换一种方式，桌子本身也可以从头到尾不一样，例如可以一头宽一头窄，一段被挡住另一段没有(例如，可以在最后的晚餐上，在荤菜一边安排有限个座位)，这就是桌子的非对称——桌子本身，而不是上面内容的非对称。

作一个类似的时间的区分。时间本身可以有各种非对称，最明显的就是它在这个方向受到限制，而另一个方向没有，可以有一个最先而不是最后的时间等。我们只要把时间想象成一种可以足够延伸的"东西"，并且，从头到尾其性质都是不一样的，而且没有固定的模式。有争议的是，如果其意义由时间流观念而来的话，那么，它也有可能提供这样一种意义，在其中时间本身具有内在的方向或非对称性(但这种用空间隐喻来区分时间本身的非对称性和时间中事物的非对称性的做法，客观现在/客观时间流观念的支持者可能并不乐意接受)。

与时间本身是否从头到尾都对称的问题并列的，还有一个时间的物理内涵是否轴对称的问题。作为类比的就是，桌子上的内容是否从头到尾对称的问题，可以看出有关时间非对称性的有趣问题与此非常相似。对于时间轴看似非对称的砖块宇宙，可以有各种面貌，例如，许多普通物理过程就发生在某一个不是别的时间方向上，似乎都展现出明显的时间取向。这就是为什么时间的反演描述看起来那么滑稽。在真实世界中，大厦可以坍塌为瓦砾，但瓦砾却不会"反坍塌"形成大厦，尽管，如果后者发生了，它所具有的力学规律的一致性并不比前者逊色(造成非对称的这个事实也是如此，甚至比这更令人迷惑)[①]。"

胡·普赖斯在时间的非对称研究过程中发现，时间的非对称性实际上可以归结为时间之中事物的(而非事件本身的)非对称性，从而将关注的重点放在事物表现出的各种各样的非对称性，胡·普赖斯认为："时间非对称的问题之一，是描述各种时间之箭——时间之中事物的非对称性，并说明它们如何相互联系，我们可称之为分类问题。问题之二可称之为谱系问题，即解释时间之中的事物为什么有这样那样饶有意味的非对称性，而所给出的基本物理定律在时间上(几乎)都表现为对称的。这种对称性大致相当于这样的原理，只要给出某个由物理定律所允许的物理过程，也就对应一个反演过程，就像电影倒放时所看到的情景。但也有一个小小的、甚至比这更微不足道的现代物理学所推崇的原理例外。这意味着迄今为止，我们对时间之箭的分类，表现出饶有趣味的非对称性——在各种饶有趣味的情况中，

① [英]胡·普赖斯.时间之矢与阿基米德之点——物理学时间的新方向[M].上海：上海科学技术出版社，2001：14—15.

世界的物理过程表现为偏向某种而不是另一种的方向[①]。"从以上叙述可见，哲学家胡·普赖斯认为物理学中通常所说的时间的非对称性就是物质变化过程的非对称性(即方向性)，而非时间本身的非对称性，并且在其著作《时间之矢与阿基米德之点——物理学时间的新方向中》详细阐述了他的这种观点。当然，胡·普赖斯观念与我们在本书中的观点完全不同，他的所有论证都是为其"砖块宇宙"的观念提供依据的，但仍不失为时间不具有方向性的重要论据。

另外，从第1章1.5节中通过对物质变化过程的时间倒流变换的详细讨论，我们知道，所有描述物质的变化过程(包括热力学系统变化过程)的物理方程都具有时间倒流变换不变性，也就是说描述在正向流逝的时间中发生的物质的变化过程的物理方程与描述在反向流逝的时间中发生的物质的变化过程的物理方程没有区别，是完全相同的，从而描述物质变化过程的物理方程的形式不会因为时间流逝方向的改变而改变，因此物质的变化过程不会因为时间流逝方向的改变而发生逆转，即时间流逝方向的改变不会对物质的变化过程产生任何影响，不可能导致任何物质的变化过程的反向，比如时间流逝方向的改变不会对物体的运动方向产生任何影响，从而当时间流逝的方向发生改变时，用于测量时间在不断流逝的时钟指针的旋转方向也不会发生逆转。由于我们只能通过对物质的运动或变化过程的观察间接地而无法直接地测量时间的倒流现象，但任何物质的变化过程的方向性与时间的方向性无关，从而无法向我们提供有关时间的流逝方向倒转的任何线索，因此在科学实验中使用任何方法都不可能观测到时间流逝方向的改变。例如，我们在黑暗的房间中倾听一只放置在房间中的机械钟钟摆周期性的摆动时所听到的只能是"……嘀——嗒——嘀——嗒——嘀——嗒……"的声音。显然，从这种形式的声响中我们根本无法辨别出时间流逝的方向，而实际上在这种声音形式中根本就不存在任何方向性要素，并且时间流逝的方向也不可能从这种声响方式中显现出来。总之，我们从任何物质的变化过程中、从任何物体在空间的运动过程(如人的生老病死的过程、单摆来回摆动的过程)中都无法观察到时间的单向性，我们所能观察到的都只能是这些变化过程本身的不可逆性。

另外，根据物理学家通常的观点，在描述可逆的物质变化过程的物理方程中时间参数 t 不具有方向性，而在描述不可逆的物质变化过程的物理方程中时间参数 t 具有方向性，这也就意味着在这两种相应类型的物理方程中时间参数 t 应该具有不同的性质，由此似乎可以推论出所谓某一变化过程的不可逆性完全是由时间的单向性而非变化过程本身的单向性所决定(或造成)，或者与时间的单向性相关。但我们知道，用不同的物理方程分别对可逆的或不可逆的物质变化过程进行描述

① [英]胡·普赖斯.时间之矢与阿基米德之点——物理学时间的新方向[M].上海:上海科学技术出版社,2001:16.

(如麦克斯韦方程对电、磁场变化过程所进行的描述以及傅里叶偏微分方程对一维热导体的热传导过程所进行的描述等)时的时间参数都是用同一个字母“t”以及完全相同的意义一以贯之地表示的,确切地说在描述任何物质变化过程的所有物理方程中所使用的都是同一个时间参数 t,并且在所有这些物理方程中,时间参数在形式及内容上都是完全相同的,并且在本质上没有任何区别(如物理学家在建立热力学方程时并没有对其中涉及的时间参数作过任何重新定义),即无论对描述可逆的还是不可逆的物质变化过程的物理方程,时间 t 都具有完全相同的性质(包括其方向性),不同之处仅仅在于被描述的物质变化过程本身或者可逆或者不可逆,这也就意味着物质变化过程的可逆性或不可逆性完全不由时间的方向性所决定,或与时间的方向性没有直接的关联,从而不可能对时间的方向性提供任何说明,所谓的可逆性或方向性只能是物质的变化过程所具有的性质而非时间所具有的性质,这显然与物理学家通常的观点相矛盾,我们因此可以下结论说时间是没有方向的。也就是说正向流逝的时间与逆向流逝的时间是无法区分、完全同一的,实际上就连时间的每一时刻的意义都是完全相同的,这些时刻只有量的区别而没有质的不同,而不是如德国物理学家奥斯特瓦尔德所说:“时间是单系列的或一维的,不容许重返过去的时间点的可能性(缺乏双重点),且据有绝对的单面性,也就是说,在前和后之间存在根本的差异[①]。”因此,正向流逝时间的方向与其逆向流逝时间的方向同样无法区别,而所谓时间的正向或逆向流逝也只存在于人的意识中,完全是人们想象的产物,从而所谓时间的正向或反向流逝是没有意义的。也就是说时间坐标轴上的时间的正负值只有大小方面的区别,而其正负号却没有方向性意义。如果说时间具有方向性,那这一方向也只能是时间的绝对值增大的方向,从而通常所谓的用正负号加以区别的方向是人们强加给时间的,因此所谓的“时间箭头”是根本不存在的。综合上述讨论我们可以获得重要结论:**时间不具有方向性**。

2.5 时间不具有流动性

在时间的诸多性质中最为神秘同时也是最难以理解的要数时间的流动性,而且时间的流动性被人们公认为是唯一能把时间与空间区别开来的性质,特别是时间的流逝被人们认为是时间的最显著的特征,是时间存在的最基本的表现形式。在人们的时间观念中,过去、现在、未来被认为是时间的最基本的结构,即在某种意义上可以认为时间是由过去的时间、现在的时刻及将来的时间三部分构成的。所谓过去的时间是已经过去并且不再存在的时间,现在的时间是现在正发生并且即将成为过去的时间,未来的时间是还未到来从而还不存在的时间。人们常常把时

① [德]F. W. 奥斯特瓦尔德. 自然哲学概论[M]. 李醒民,译. 北京:商务印书馆,2012:89.

间比作川流不息的河水或永不停顿的箭矢，其流动的方向是从过去到现在再到未来，人们对已经过去的时间的无可奈何、对未来的时间的无限憧憬，这些是对时间的流动性的真切感受。但历史上也有学者认为我们感觉到的所谓的时间的流逝其实不过是我们头脑中的幻觉，时间并不具有流动性。那么，时间到底是否具有流动性？这是怎样的一种流动性？我们如何去证明时间的流动性呢？下面我们将对关于时间的流动性问题进行讨论。

2.5.1 时间的不流动性

时间是不断流逝(即流动)的这一观念是古人在长期的生产实践中逐渐形成的，古今中外哲学家、科学家以及各类名人对其都有过描述，今天这一观念已成为人类文化及生活中常识性的内容。在中国古代，关于时间的流逝性的诗句不胜枚举，其中最著名的是孔子的"逝者如斯夫，不舍昼夜"；明朝文嘉的《明日歌》也是非常有名的、最为人们传诵的关于时间流逝的诗句："明日复明日，明日何其多！日日待明日，万事成蹉跎。世人皆被明日累，春去秋来老将至。晨昏滚滚水东流，今古悠悠日西坠。百年明日有几何？请君听我《明日歌》！"此外还有如"光阴似箭，日月如梭"，"时间有三种步伐：未来姗姗来迟，现在像箭一样飞逝，过去永远静止不动"；而在古希腊，众多的哲学家都对时间的流动性问题进行了深入思考，而亚里士多德则在其《物理学》中首次对时间的流动性进行了详细分析并详细、系统阐述了关于时间具有流动性的观念："它的一部分已经存在过，现在已不再存在，它的另一部分有待产生现在尚未存在。并且，无论是无限的时间长流，还是随便挑取其中任何一段，都是由这两部分合成①。""如所说的，'现在'是时间的一个环节，连接着过去的时间和将来的时间，它又是时间的一个限：将来时间的开始，过去时间的终结②。"又说："既然'现在'是时间的终点和起点，但不是同一时间的终点和起点，而是已过时间的终点和将来时间的起点，那么就像圆的凸和凹在某种意义上时同一的，时间也这样，永远在开始和终结之中。也因为此，它显得总是不同的，因为'现在'不是同一段时间的开始和终结，否则它将同时而为同一事物的对立两面了。时间也不会消灭，因为它总是在开始着③。"

对于亚里士多德在其著作中提到的关于时间流动性的观念，德国哲学家克劳斯·黑尔德在其时间的现象学著作中进行了如下生动地描述："这样理解的'现在'就具有了一种边界；边界，比如两个国家的空间边界，是两国的连接，又是两国的分离。我们称之为'现在'，'此瞬间'、'今天'等等的边界，与空间的边界显然不同。

① [古希腊]亚里士多德. 物理学[M]. 张竹明，译. 北京：商务印书馆出版，1997：121.
② [古希腊]亚里士多德. 物理学[M]. 张竹明，译. 北京：商务印书馆出版，1997：132.
③ [古希腊]亚里士多德. 物理学[M]. 张竹明，译. 北京：商务印书馆出版，1997：133.

空间的边界，是静止的，我们可以在地图上看到它们，而时间的这个边界是一种特殊的边界，它是流动的，它是不断推移的。当我说'现在'时，我所意指的那个'现在'，已经滑到过去了。如果我想把现在固定下来的话，我总是来得太晚。作为瞬间的现在，总是由'将来'这个时间段过渡到'过去'这个时间段的一节时段；它不让你将其固定下来，它根本就是流动的[①]。"又如吴国盛教授在其著作中列举的英国思想家卡莱尔对时间的流动性的描述："英国思想家卡莱尔(1795—1881年)在他的《神圣英雄》中有一段很精彩的描述：那无边无际、缄默不语、永不静止的东西叫做时间；它匆匆流逝、奔腾而去，既迅速又宁静；它就像是把一切都包含在内的大海的潮汐，而我们和整个世界就像是游浮在它上面的薄雾；它就像是个幽灵，一会儿出现，一会儿消失：这确确实实地永远是一个奇迹，是一种使我们哑口无言的事物[②]。"而罗马思想家奥勒留在其《沉思集》中写道："时间，既像由所发生的情况组成的事件之河，又像一条湍急的溪流，因为一件事情刚了解清楚，它就匆匆而去，由另一件事将其取代，而这件事情随后也会匆匆而去[③]。"再如诗人玛丽娜·卡特斯(Marina Katys)关于时间流逝的优美诗句："我对自己说，时间似流水滑过指间，/渗入慢慢冷却的沙土，无处不在……/即使冥河可以隔断生和死，/世纪轮回之时，/它也将消逝无踪。/但有一条河将永远存在，/没有岸堤能够限制它的流动……/所有人都必将没入其中。/它的水流透明而漆黑，/世界万物尽在其中。/文字中有它，音乐中有它。/每个人只能在河中跋涉一次，/永远无法找到它神秘的源头。/那时，时间蜷缩在小小的茧中，/躺在'永恒'崎岖不平的胸膛上沉睡[④]。"我们还可以列举出无数关于时间流逝的著名诗句以及相关论述。

而在科学史上最著名的关于时间的流动性的定义是牛顿在其《自然哲学的数学原理》中给出的："绝对的、真实的、数学的时间，这种时间由其本身的特性所决定，它均匀地流逝着，与外在的所有事物没有任何关系，因此，它又被称为延续的时间[⑤]。"又如现代著名物理学家布赖恩·格林在其著作中也对时间的流动性有过精彩的描述："时间看起来是可以流动的。这就像我们站在时间之河的岸旁，看着汹涌澎湃的急流奔腾而去，每一朵未来的浪花经过我们的那一刻就成为现在，当急流远去奔向下游时就是过去。如果你觉得这种理解太过被动的话，可以把这个比喻颠倒一下：时间之河载着我们毫不停歇地向前驶去，从现在到下一刻，经过的景色远远褪去之时就成为过去，未来总在下游等待着我们(经验告诉我们，时间这个概

① [德]克劳斯·黑尔德.时间现象学的基本概念[M].靳希平，孙周兴，张灯，柯小刚，译.译文出版社，2009：41—42.
② 吴国盛.时间的观念[M].中国社会科学出版社，1996：25.
③ 吴国盛.时间的观念[M].北京：中国社会科学出版社，1996：25.
④ [俄]伊戈尔.诺维科夫.时间之河[M].吴王杰，陆雪莹，闵锐，译.上海：上海科学技术出版社，2001.
⑤ [英]艾萨克·牛顿.自然哲学的数学原理[M].曾琼瑶，王莹，王美霞，译.南京：江苏人民出版社，2011：7.

念常常激发一些让人多愁善感的比喻)[①]。"而牛顿之后的科学家在牛顿所提出的时间流动性定义的基础上将这一均匀流逝的时间之流用一条数轴(即时间轴)进行描述,而这条数轴上的每一个点对应于"现在"(当下)变化正在发生的这一时刻,随着时间的流逝,"现在"也在不断地向"未来"方向移动,而正是不同的两个"现在"时刻构成了两者之间确定的时间间隔或者时间段。

此外,还有人试图通过建立相应的宇宙模型来说明时间可以脱离物质的变化过程而独自流逝的观点:"美国哲学家悉尼·舒梅克(Sydney Shoemaker)假设了一个特定环节,看上去好像有经验主义的缘由来说明无需变化的时间流逝。假想一下世界是由3个地区构成——3个星系,为A、B和C。假想每一个地区的居民都可以与其他地区的居民相互观察并且进行交流。他们注意到这些局部的冻结以规则的时间间隔发生:A星系每3年一次、B星系每4年一次、C星系每5年一次。当给定这些冻结率之后,可以估算出C应该每12年就能观察到A和B同时被动。这就是所发生的事情,并且由C告知A和B。由简单的算数可以得到A、B和C每60年才会同时被冻结。然而,因为是它们组成了整个世界,那就意味着这世界有理由相信整个世界会每60年被冻结一次;也就是说,在没有任何变化发生的情况下,时间将走一年[②]。"

可见,自古希腊时期开始,时间是不断流逝的这一观念就已经开始逐渐被人们广泛地接受并深入地思考着,我国古代在早于古希腊的春秋战国时期的孔子就已经开始关注时间的流逝这一现象,而在当今科学及哲学界,时间是不断流逝的这一观念基本上被默认为一条不需要进一步论证的公理。实际上,时间具有流逝的观念早在古代时就已经几乎在各自独立的几大人类文明体系同时形成了,而即使到了现在,人们依然将时间的流逝性看做是如此明显、随处可见的事实:我们静静地坐在沙发上闭目养神时,时间正在悄悄地流逝;当我们随意翻阅着书籍时,时间正在悄悄地流逝;钟表指针在钟面转动时,时间正在悄悄地流逝;水滴从水阀中一滴一滴落下时,时间正在悄悄地流逝;春天的微风轻抚着我们的脸颊时,时间正在悄悄地流逝;当我们坐在公交车上惬意地欣赏着路边一片片蛋黄色的油菜花时,时间正在悄悄地流逝着;清澈的水流在小溪中静静地淌过时,时间正在悄悄地流逝;太阳当空转过时时间正在悄悄地流逝……也就是说,在我们周围、甚至在宇宙空间的任何哪怕最细微的角落中,时间似乎都在永恒的流逝着。现在,时间具有流逝性这一观念已经成为整个人类文明的时间概念体系的重要基础,特别是物理学中将时间用抽象的数学模型——时间轴——进行描述的唯一方式被认为是进一步强化了

---

① [英]布赖恩·格林.宇宙的结构——空间、时间以及真实性的意义[M].刘茗引,译.长沙:湖南科学技术出版社,2012:137.

② [英]克怀格·卡伦德,拉尔夫·埃德尼.视读时间[M].张颖,译.合肥:安徽文艺出版社.2007:23.

时间具有流动性的基础。但我们下面的分析表明这一基础并非坚如磐石，它是由诸多根本无法解决的问题所构成的。

实际上，我们可以提出许多关于时间流动性的问题，而且每一个问题都难以回答，如最初人类是如何获得时间具有流动性的观念的？时间的流逝到底是人的错觉还是真实的现象？时间的流逝是相对的还是绝对的？时间的流逝能否被测量、如何测量？如果说物体运动的速度可以借助速度公式进行计算，那么时间流逝的速度如何计算？在空无一物的空间里时间能否流动？时间的流逝独立于物质对象吗？如果假定时间是无限的，那么在宇宙产生之前时间处于流动状态吗？我们又是如何知道时间在宇宙产生之前的流动的？独立于物质对象的时间的流动有何意义、会留下什么痕迹？非物质性的时间是如何又是怎样流动起来的、会对物质的运动及变化产生什么影响？我们如何证明及想象时间的流动性？显然，我们还可以提出更多关于时间的流动性的问题，而要回答这些问题都必然会涉及时间的本质，这几乎是所有关于时间的问题的特征。难怪伟大的神学家及哲学家圣·奥古斯丁(St. Augustine)在回答什么是时间的问题时会坦言："什么是时间？如果没有人问我，我知道。可是当我想向问我的人解释时，我坦白我不知道。"显然，任何关于时间的问题最终都会指向时间的本质，而任何人在试图解决这些问题时都将处于与圣·奥古斯丁同样的两难境地。早在两千多年前的古希腊就有人对时间的流动性观念的提出过质疑，如虽然亚里士多德始终坚持时间具有流动性的观念，但在其《物理学》中对关于时间问题的分析中就提及对时间流动性问题的困惑："它的一部分已经存在过，现在已经不存在，它的另一部分有待产生，现在尚未存在。并且，无论是无限的时间之长流，还是随便挑取的其中任何一段，都是由这两部分合成的。而由不存在的事物所合成的事物是不可能属于存在的事物之列的[①]。"

而人类社会进入到20世纪后，随着科学技术的发展，对于时间的流动是如何可能的问题的科学家及哲学家们仍然没有获得任何线索，反倒感觉时间的流动性越来越像是幻觉，对此英国物理学家保罗·戴维斯在其著作中有详细地描述："感到让时间流动有困难的不仅仅是物理学家。数十年来，哲学家一直试图掌握时间这一难以捉摸的流动性，却发现它因语言上的混乱而无法理解。在这一课题上所费的墨水都已汇成大海(河?)，而时间的流动性仍像以前一样神秘莫测。事实上，时间流动如此神秘，以至于哲学家们如斯马特不得不断定根本不存在时间之河。可以说，它们全都存在于人们的头脑中。'我们当然感到时间在流动'，斯马特退一步承认说，但在他看来，'这种幻觉的产生是由于超感觉的混乱'。实际上，他坚信这不过是'幻觉'。这是哪种幻觉？一种大致相似的情况有助于理解这种幻觉。如

① [古希腊]亚里士多德.物理学[M].张竹明，译.北京：商务印书馆，1997：121.

果你快速旋转，然后停下来，世界‘继续转动’。眩晕的感觉给人产生的印象是世界在运动——事实上是处于旋转状态。当然，你清楚事实并非如此。你只需目不转睛凝视着房间的墙壁就会发现它并不转动。理智地，你就可以把运动排除在外。然而，这情形还是让人觉得世界似乎在运动。大概时间的流动也仅仅是一种感觉，当我们一门心思去推敲世界上所有事件的合理性时，它却完全消失了。……在论述了时间的流动是幻觉以后，斯马特承认‘这是一种奇怪有颇伤脑筋的幻觉’。它由何而起？它是一种与记忆相关的时间混乱，还是知识在人脑中的流动？解释这一独特幻觉的问题是：它似乎是荒谬的幻觉。不仅仅是我们的感觉在误导我们，例如木棍在水中看去是弯曲的。我们似乎对某物有深刻印象，可是，仔细推敲一个事物时，它却毫无意义[①]。”可见，关于时间流逝的问题一直以来都是令科学家、哲学家们深感困惑的问题，特别是下面我们将要提及并深入讨论的一些关于时间的流动性的重要悖论更进一步加深了人们对时间的这一特性理解上的困惑。虽然基于时间具有流动性的理论体系存在许多难以解决的问题，甚至感觉时间的流逝或许根本就没有发生，仅仅是在人类大脑中形成的幻觉，但仍然没有动摇包括古今中外的哲学家及科学家在内的几乎所有人把时间的流动性作为不需要加以证明的公理去接受这样一个信念。

我们知道，时间具有流动性的观念是人类文明中仅仅凭感觉经验获得的对时间的特性认识的重要内容，这一观念完全是人类凭借对物质的变化过程的感觉及直觉而形成的，迄今为止还没有人提出、更没有实施过对这一观念的任何科学的实验方法，更没有获得过任何科学实验的支持。美国著名物理学家布赖恩·格林在其著作中的叙述反映了人们关于时间的流动性观念的这一状况：“时间会流动吗？从有意识的人的角度来看，答案是显然的。当我打出这些字时，清晰地感觉到了时间在流动。每一次按键，都意味着现在将让位于下一刻的到来。当你读这些字，当眼睛从一个字扫到下一个字时，你也一定感觉到了时间的流动。但是，虽然物理学家们努力尝试过，可没有人在物理定律中找到任何令人信服的证据，支持时间可以流动这种直观感受。实际上，对爱因斯坦狭义相对论思想的一些在思考却为时间不会流动提供了证据[②]。”而英国物理学家保罗·戴维斯在其著作中则表达了为何到现在为止仍然没有人能够提出具体的实验来验证时间的流逝性观念的原因：“戴维·帕克(David Park)是马萨诸塞州威廉斯学院(Williams College)的物理学家和哲学家，他对时间这一课题终生都怀着浓厚兴趣，他也认为时间不流逝。在帕克看

---

① [英]保罗·戴维斯. 关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M]. 崔存明，译. 长春：吉林人民出版社，2002：353—356.

② [英]布赖恩·格林. 宇宙的结构——空间、时间以及真实性的意义[M]. 刘茗引，译. 长沙：湖南科学技术出版社，2012：138.

来，时间流逝与其说是幻觉，不如说是神话，‘因为它不欺骗我们的感觉。……人们不可能展开实验来证实时间流逝与否’。这当然是有力论证。毕竟，哪种现实可能附属于永远不能被实验证实的现象？实际上，人们甚至还不清楚如何考虑用实验验证时间的流动。因为实验设备、实验室、实验人员、技术员、人类和作为整体的宇宙显然被卷入这不可避免的流动中，为了记录下其余部分的流动，宇宙中的任何部分如何能‘停在时间中’？与此相类似，我们还可宣称整个宇宙以相同的速度在空中运动——或者，说得更近似点，空间在空间中运动。这种说法如何能得到验证[①]。”保罗·戴维斯的上述描述中显然隐含着宇宙中的所有物质都“漂浮”在“时间之河”之上这一前提，而如果假定所有物质并不随“时间之河”顺流而下，那么要想借助实验证明时间的流动性，所谓的时间流中必须具有某种我们可以借以辨识这种流动性并随其一起飘浮的物质性标记，并且这种标记物能够对我们的实验装置产生作用，从而使得该装置可以实现对时间流动性的测量。而由于所谓的时间流中并没有任何具有绝对意义的物质性标记可供我们进行辨识，以确定时间流中的任何时刻是否发生了变动，因此我们认为，由于时间的流动性不可能对物质的变化过程产生任何影响(因为任何物质的变化都可以归结为发生变化的背后的力的相互作用，因此不存在必须借助时间的作用才能解释的现象)，从而也就不可能产生任何可以观察到的物理或其他任何效应，因此绝对不存在任何科学的实验能够证明时间具有流动性。

不仅如此，关于时间具有流动性的观念同样也没有经过理论(包括逻辑学)的证明，而且对其衍生出来的各种问题所进行的相应的逻辑方面的分析还导致了诸多悖论的出现。如在前面我们引述的亚里士多德的《物理学》中对时间的流动性的分析已经触及到关于时间的流动性存在的悖论，即通过对时间具有流动性的假定导出了时间似乎不存在的结论。又如对时间流动速度问题的回答：因为任何流动从而也包括时间的流动都具有(用速度描述的)快慢，如果时间具有流动性，那么这种流动性必定具有流动的快慢问题，而这与亚里士多德在其《物理学》中经过详细的分析得出结论是相矛盾的：对时间而言不能说快慢、只能说多少。而且关于时间的流动速度是多少及如何计算的解答同样会带来无法解决的问题。对于时间的流动速度是多少的问题，英国物理学家在其著作中是这样转述杰克·斯马特的观点的：“运动的现在与静态的时间坐标之间的矛盾显然归纳在杰克·斯马特提出的这一引人注意的问题中：时间流动得有多快？我们全都知道答复：每秒钟一秒。比喻的不恰当性立即显露出来。速度可定义为每单位时间所运动的距离，时间怎能‘按

① [英]保罗·戴维斯．关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M]．崔存明，译．长春：吉林人民出版社，2002：356—357．

时间'运动[①]?"

再者，从时间具有流动性这一前提条件还可以导出时间的流动是没有意义的结论：假如我们的宇宙是有起源的以及时间是不断流逝的，并且时间的流逝独立于物质及其变化过程，那么在宇宙诞生前就应该存在一段无限长的空虚的时间段，即在这段时间中没有任何物质的变化过程发生过，而时间也一直处于与外界无关的流逝状态中。但由于时间的流逝是独自进行的，在宇宙诞生前这种时间的流逝不可能留下任何痕迹，因此我们没有任何方法可以知道在宇宙诞生前曾经经历了一段无限长的时间段的流逝，这也就意味着所发生的这段无限长的时间段的流逝是没有任何意义的，即时间具有流动性导出了没有意义的时间段的流逝，而我们这里假定了无论有无物质存在时间的流逝都是与物质及其变化过程无关的，从而时间的流逝在任何情况下都没有意义，从时间具有流动性推论出时间的流动性是没有意义的，这就产生了悖论。而最为有名的因时间的流动性造成的悖论是所谓的麦克塔格特悖论，该悖论是由英国哲学家麦克塔格特(J. M. E Taggart)于 1893 年提出的。

在提出悖论之前，麦克塔格特把在时间中发生的事件用两种方式进行了排序，从而得到了两个序列。第一个序列被麦克塔格特称做 A 序列，这是把事件 A、B、C、D……等按发生的先后顺序依次排列所构成的序列，将 A 序列中事件的顺序定义为从遥远的过去到最近的过去再到现在再到最近的将来直至遥远的将来，如图 2-1 所示。图 2-1 中任何一个事件在该序列中都是以从遥远的过去到最近的过去再到现在再到最近的将来直到遥远的将来的方式排列的。这是说一个事件在 A 序列中的位置始终处于变化过程中：它首先是将来，而后是现在，最后是过去，而一旦它到达现在处于正在发生的状态，它就将即刻成为过去。第二个序列被麦克塔格特称做 B 序列，这是把序列中的 A、B、C、D……等事件按早于和同时两种关系进行排列的序列，如图 2-2 所示。从图 2-2 中可见，排在 B 序列中的任何事件在序列中的相对位置是不会变化的，而如果某一时刻事件 A 早于事件 C，那么在任一时刻事件 A 都必定早于事件 C。由于任何一个事件序列都可以同时用 A 序列与 B 序列两种方式进行排列，那么这两个时间序列必定具有某种逻辑关系，麦克塔格特认为 A 序列比 B 序列更基本，即 B 序列可以由 A 序列衍生出来。理由非常明显，即 A 序列比 B 序列包含更多的信息，借助 A 序列除了可以确定该序列中每一个事件处于未来、现在、过去等某个时间区段的信息之外，还包含所有事件之间的早、晚及同时关系，除非再额外提供其他信息，一般而言 B 序列只能提供该序列中所有事件之间早、晚及同时关系的信息，这也就是说 B 序列是 A 序列的衍生物，从

---

① [英]保罗·戴维斯.关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M].崔存明，译.长春：吉林人民出版社，2002：355.

而A序列比B序列更基本，也即A序列的所有性质都可以推广到B序列。经过上述步骤后，麦克塔格特重点对A序列的特征进行了详细地分析、研究，并给出了如下关于A序列的非实在性的证明：

① 如果时间是实在的，那么存在一个A序列(A序列是最基本的时间序列)。

② A序列中的不同位置是互不相容的，所以一个事件的位置不能多于一个。

③ 如果存在一个A序列，那么所有事件都会走遍A序列的所有位置，因为事件在A序列中的位置是变化的。

所以：

④ 如果存在一个A序列，那么任意一个事件既只能有一个位置同时又可以有所有的位置，但这是荒谬的。

所以：

⑤ 没有A序列。

所以：

⑥ 时间是非实在的。

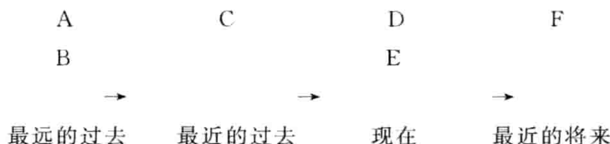


图2-1 A序列示意图



图2-2 B序列示意图

由此可见，A序列本身就是自相矛盾的，麦克塔格特因此认为A序列不具有实在性，从而是不可能存在的。但是这里的矛盾似乎并不是显而易见的，麦克塔格特为彻底解决其中存在的矛盾，将A序列中的每一个事件所具有的三种不同的时刻(未来、现在及过去)赋予每一个时刻并进行相应地推理，最终却导致了无穷递归序列的出现。对此，吴国盛教授在其著作中进行了详细地论述："尽管这三个定位彼此互不相容，也尽管每一事件都拥有这三个定位，但是，任何一个事件并不是同时拥有这三个定位，而是依次(successively)拥有。如果M是过去，那它曾经是现在和未来；如果它是未来，那它将是现在和过去；如果它是现在，那它曾是将来将是过去。这里似乎没有什么矛盾。麦克塔格特承认这一点，但他接着问：'依次(相继)拥有'是什么意思？'依次(相继)'是什么意思？'依次'无非是说，使事件M拥有

三个定位的，是三种不同的时刻：在现在的时刻是现在，在未来的时刻是过去，在过去的时刻是未来。然而，这不过是将'事件 M'的三个定位矛盾转嫁给'时刻'身上。因为每一时刻如同每一事件，也会拥有过去、现在和未来这三个不相容的定位。同样的问题出现了。为了化解'事件'的定位矛盾（既是过去也是现在和未来），我们求助于'时刻'（是不同的时刻使得事件是过去、是现在、是未来）。然而，'时刻'也处于一个 A 序列之中，也存在定位矛盾（既是过去也是现在和未来）。为了化解'时刻'的定位矛盾，我们又得求助又一层次的 A 序列。矛盾并没有被真正化解，而只是陷于一个无穷后退[①]。"可见，为了合理地描述时间的流动性，在 A 序列中就必须引入第二个时间序列，当这第二个时间序列被引入后，前一个时间序列的流动性就成了可以描述的，但对于第二个时间序列同样涉及流动性问题，也即要描述第二个时间序列的流动性又必须引入第三个时间序列……如此等等以至无穷。由此可见，麦克塔格特的上述推理从 A 序列的存在导致了对 A 序列存在的否定，这就是著名的麦克塔格特悖论。上述分析及推理过程看上去的确非常严谨、几乎无懈可击，因此，人们关于时间具有流动性的观念乃至时间的存在本身都面临空前的危机。

从上面所涉及的几个悖论可见，时间具有流动性的观念总是导致悖论的产生，进而导致对时间自身的否定。对于由时间的流动性的观念所导致的各种悖论，特别是麦克塔格特悖论，有的学者（如 C. 布劳德等）试图通过把时间的流动性看做第一性的和不可分析的客观事实来解决问题。而另一些学者（如 A. 格留鲍姆等）则在不否定时间具有客观实在性的前提下提出了完全不同的看法，认为可以假定时间本身具有客观实在性，但时间的流逝本身必须被认为是由人的主观意识的产物，它和感性的质（黄色的、绿色的、热的等）相类似。正如前苏联哲学家 A. M. 莫斯杰巴宁柯在其著作中所说的："按照 A. 格留鲍姆的观点，时间的生成不具有物理事件'本身'的属性，它和感性的质一样，只有在有观察者的时候才产生。格留鲍姆认为，假如时间的生成是客观的，那么就可以借助于科学的方法来认识它和描述它，而实际情况并非如此。在物理学的规律中有时间的秩序和方向，但在物理学规律中，从来没有谈到时间的生成。按照格留鲍姆的观点，'时间的流动'乃是表述时间的各向异性（方向）的比喻[②]。"英国物理学家保罗·戴维斯在其著作中也表达了类似的观点："确实，人类的许多关注点取决于时间的流逝：我们的希望与恐惧，我们的怀旧，我们的宿命感。从宗教和文学的伟大作品直至我们生活中日复一日的组织状态，人类的一切努力都是在时间之河中上演的奋斗。然而，这些不过是生活主

---

① 吴国盛. 时间的观念[M]. 北京：中国社会科学出版社，1996：224－225.

② ［苏］A. M. 莫斯杰巴宁柯. 宏观世界、巨大世界和微观世界的空间和时间[M]. 王鹏令，陈道馥，译. 北京：中国社会科学出版社，1985：65—66.

观的、感性的方面。涉及宇宙的客观属性的，谈论时间流动似乎是多余的。事实上，我们能够与外星人交谈。确实，当我们讨论客观世界中的事件时，我们发现运用时间流动语言很合适，但我们无需这么做[①]。"又如保罗·戴维斯在其另一部著作中关于一个物理学家和一个怀疑论者之间的对话中，物理学家观点的叙述："时间的流逝，就像眩晕时感觉到的空间在打转儿，不过是一种时间性的眩晕而已。时间流逝这种幻觉之所以有了一个虚假的真实外表，是我们混乱的语言造成的。语言里的时态结构和那些关于过去、现在、将来的无意义的词语使得时间流逝的幻觉是实有其事[②]。"保罗·戴维斯还认为："无疑，我们在安排日常事务时是大大依仗过去、现在、将来这些概念的。我们从不怀疑时间真是在流逝。即便是物理学家，要是头脑里一放松分析推理这根弦，就会很快地在言谈思维中像常人一样认为时间是流逝的。然而，必须承认，我们越是仔细检查过去、现在、将来这些概念，这些概念似乎就越是变得难以把握，晦涩不明，我们的陈述不是同一反复，就是无意义。在物理学的世界里，物理学家不需要时间的流逝或现在之类的东西[③]。"上面提及的第一种观点显然是将时间的流动性看做不需要再作进一步分析的公理，也是当今绝大多数学者所坚持的。而第二种认为时间的流逝完全是人的主观意识的产物的观点则为我们开启了对相关问题进行深入研究的大门，但由于同样只有人类的感觉经验的支持而缺乏科学实验的佐证，因此需要进行详细地讨论。

可以看出，上面麦克塔格特所列出的 B 序列实际上仅仅只是 A 序列的一个组成部分，而非可以独立于 A 序列而存在的一个序列。在对 A 序列的研究过程中为了特别突出所发生的事件之间的顺序关系，我们可以将 A 序列中所有事件所对应的时刻忽略，从而仅仅只是将所有事件按所发生的先后顺序列出，这样就可得到所谓的 B 序列，因此我们坚持麦克塔格特所认为的 B 序列是 A 序列的衍生物，从而 A 序列比 B 序列更基本的观点，并将重点放在对 A 序列的讨论上。下面我们就对麦克塔格特所引入的 A 序列及其导致悖论产生的根源进行深入地分析。由于任何物质的变化过程都具有时间性，从而无论是按发生的先后顺序排列的事件之间还是从还没有发生到正在发生再到已经发生过的单一事件的发生过程看相应的过程都是具有时间性的，因此，A 序列中实际上隐含了一个时间坐标轴（在图 2-1 中是借助"遥远的过去→最近的过去→现在→最近的将来"来表示的），为便于讨论我们暂且将其称之为时间序列。这样，按发生的先后顺序排列在 A 序列中的每一个事件，在时间坐标轴上都具有相应的时刻定位，而时间坐标轴上的每一时刻都由这一时刻上所发生的事件进行定义并加以确定，这也就意味着 A 序列既非纯粹的事

① ［英］保罗·戴维斯．关于时间——爱因斯坦未完成的革命［M］．崔存明，译．长春：吉林人民出版社，2002：357．

② ［英］保罗·戴维斯．上帝与新物理学［M］．徐培，译．长沙：湖南科学技术出版社，1994：142—143．

③ ［英］保罗·戴维斯．上帝与新物理学［M］．徐培，译．长沙：湖南科学技术出版社，1994：143．

件序列也非纯粹的时间序列(这一点从麦克塔格特在对 A 序列的详细分析中也可以看到),从而并非如麦克塔格特所说是最基本的时间序列,而是可以看做由事件序列与时间序列相互叠加在一起的复杂序列,同时这两个序列互为前提、相互交织、密不可分。其中,A 序列的事件序列中的每一个事件的发生总是按从未来到现在再到过去的方向进行的,而 A 序列的时间序列中的时间的流逝则是按从过去到现在再到未来的方向进行的。显然,A 序列中的事件序列与时间序列都被认为是"流动的",并且事件序列中的每一个事件发生的方向都与时间序列中时间流逝的方向相反,因此两个序列之间存在相对的"流动"。那么我们应该如何对 A 序列进行描述呢?我们知道,要描述一个对象必须选择一个合适的视角,即采用一个标准。如要确定物质的变化,我们常常以时间为标准,通过计算不同时刻描述物质状态的物理量的差值加以确定;而要确定时间的流动性,我们又需要以物质的变化为基准。具体地说,要确定时间的流动、流动了多少,我们需要确定"现在"的时刻与时间原点的差值,而要定义时间的原点又必须使用物质性的事件(比如我们的公元纪年的原点是用耶稣诞辰这一历史事件);而要确定精细的时间流动的情况则必须使用时钟,要确定更加长的时间段的流动还可以借助星体的周期性运动等。可见,通常情况下我们既可以时间为标准(或者参照物)对物质的变化过程进行描述,也可以以物质及其变化过程(即一个个事件)为标准对时间的流逝进行描述,亚里士多德在其《物理学》中就对时间与物体的运动之间的这种可以相互确定、相互描述的情况进行过详细论述:"我们不仅用时间计量运动,也用运动计量时间,因为它们是相互确定的。时间既然是运动的数,所以它确定运动。运动也确定时间。我们说出用运动计量的时间是多是少,就像用被计量的事物来说出数一样,例如用一匹马作为单位来说出马的数目。我们是靠了数来认识马的多少的,反过来,又靠了一匹马作为单位来认识马的数目。在时间和运动的关系上也一样,因为我们一方面用时间来计量运动,另一方面也用运动来计量时间①。"

但在具体地描述物质的变化过程中,我们只能选择一个标准,并且标准一旦选定就不能随意变更,否则就违反了逻辑学中的同一律,从而有可能得到似是而非的结论。实际上在上述推论中,麦克塔格特就在无意中交替使用了事件序列或时间序列并以此为标准对另一个序列的变化进行了描述。在上面的推理步骤②中,麦克塔格特显然是"站在"整个事件序列的角度从而以之为标准并与其保持"静止"状态。在这种情况下,事件序列中的任何一个事件在整个事件序列中的位置都是固定不变的,同时由于事件序列中的任何一个事件都与其他事件是有严格界限的,因此事件序列中的不同位置是互不相容的,一个事件在整个事件序列中只能占据一

① [古希腊]亚里士多德.物理学[M].张竹明,译.北京:商务印书馆,1997:128－129.

个位置而不可能同时占据一个以上的不同位置，由此可以得到"一个事件的位置不能多于一个"这样的结论。实际上B序列就是以事件为参照物的序列，从而"B序列中所有事件均作为一个固定的事件出现，不可能有变化"[①]，在这种情况下时间序列相对于事件序列而言是流动的，整个事件序列作为一个整体"穿行"于时间序列中。而在推理步骤③中，麦克塔格特则显然"站在"时间序列的角度，从而以时间序列为标准并与时间序列之间保持"静止"。由于时间序列被认为是不断流动着的，因此，相对于麦克塔格特而言，事件序列中的每一个事件都被认为必须经历从未来的时间到现在的时间再到过去的所有时间，即每一个事件都要经过时间序列中的所有点或所有位置，麦克塔格特因此下结论说"所有事件都会走遍A序列的所有位置"，或者说每一个事件都拥有过去、现在、未来这三个定位，而这三个定位是彼此不相容的，因此这里似乎并不存在矛盾，正如吴国盛教授在其著作中所说："尽管这三个定位彼此互不相容，也尽管每一事件都拥有这三个定位，但是，任何一个事件并不是同时拥有这三个定位，而是依次(successively)拥有。如果M是过去，那它曾经是现在和未来；如果它是未来，那它将是现在和过去。这里似乎没有什么矛盾[②]。"而在推理步骤④中，麦克塔格特则又同时"站在"事件序列和时间序列的角度根据步骤②及步骤③而获得A序列是存在明显矛盾的这样一个结论。

而为了更加突显、放大整个A序列存在的矛盾，麦克塔格特则进一步将每一个事件所具有的从未来到现在再到过去的变化形式赋予时间序列，即认为时间序列中每一个点(即时刻)同样要经历从未来到现在再到过去这样一个变化过程，从而被作为特殊的事件序列，由此可见，在麦克塔格特的论述中，时间序列已经不仅仅作为描述、测量事件序列的标准，同时还作为被描述、测量的对象；因此，要描述、测量这一对象又必须引入第二级的标准时间序列，而这第二级的标准时间序列同样也存在变化的问题，从而又必须再引入更高一级的时间序列……最终，时间序列就进入描述与被描述这种自我纠缠的无限循环之中。由此可见，正是由于麦克塔格特在推理过程中交替使用不同的标准、从不同的角度进行判断，将时间序列既作为进行描述及测量的标准(从而要求时间是静止的)，同时又作为被描述及测量的对象(麦克塔格特认为是流动的)，即归结为用时间描述及测量时间自身(即用时间描述时间)，从而使得时间既静止又流动，最终才会导致悖论的产生。这种推理方式明显违反了逻辑推理过程中"A是A"的同一律，因为同一律要求我们在进行同一逻辑推理过程中必须在同一意义上使用相应的概念及判断，不能混淆不相同的概念及判断，确保每一个概念的内涵与外延都完全同一，否则就会得到错误的结

① 吴国盛.时间的观念[M].北京:中国社会科学出版社,1996:221.

② 吴国盛.时间的观念[M].北京:中国社会科学出版社,1996:224—225.

论。这就要求麦克塔格特在推理过程中必须确保时间概念的同一,即或者只是将时间作为对变化过程进行测量的标准,或者只是将时间作为被测量及描述的对象,而不能两者交替地进行。

由于麦克塔格特悖论涉及A序列的无限后退,因此要解决麦克塔格特悖论就必须找到能够终止A序列"无限后退"的机制,而最有效的方法就是在上述推理过程中必须站在时间序列的角度,认为时间序列始终是静止的、不变化的(唯有如此,时间才能作为衡量变化的标准),并且一以贯之地将描述事件序列的时间序列始终作为用于描述、测量事件序列的标准,这种情况下时间序列之上的每一时刻并不具有从未来到现在再到过去这种性质,也就是说时间不会在宇宙空间任何角落处"嘀嗒"作响。我们知道,A序列是对事件的变化形式的完备描述,同时由于A序列又是由事件序列及时间序列构成,并且构成A序列的这两个序列之间存在相对的"流动",因此,即使假定了时间序列是静止的,也不会影响我们对A序列中的事件序列与时间序列之间的相对"流动"的理解。实际上,由于不可能直接对时间进行感知及测量,从而我们看到的总是物质变化过程中的任何一个状态不断从未来到现在再到过去的方式进行着却从来没有见到(而且也根本无法用实验验证)时间不断以从过去到现在再到未来的方式流动,因此,即使我们假定了A序列中的事件序列与时间序列其中之一是"静止的",也不会影响这两个序列之间所存在的相对"流动"的情况,即这两个序列之间相对的"流动"依然存在,也就是说假定事件序列与时间序列两者都具有流动性显然是多余的。可见,只有假定时间不具有流动性,时间序列的无穷倒退才会即刻停止,麦克塔格特悖论以及其他关于时间流动性的悖论才能得以完全消除。由上面对麦克塔格特悖论的分析过程可见,通过引入时间不具有流动性的假设,即假定时间的流逝只是人类心理的、主观的感觉,而不是时间本身所具有的本质特性(这样的假定并不会否定时间的存在),我们就可以从根本上消除麦克塔格特悖论。不仅如此,实际上我们通过引入时间不具有流动性这一假设可以消除由时间具有流动性的观点而导致的所有悖论。由此可见,由于时间的流动性所导致的麦克塔格特悖论的出现恰恰反证了时间不具有流动性这一重要特性。显然,这一假设与我们从上一节中获得的关于时间不具有方向性的结论是完全一致的。

以上我们通过对麦克塔格特悖论的详细分析提出了时间不具有流动性这一观点用以消除该悖论,实际上这也是避免所有由时间的流动性观念导致悖论产生的根本方法。除此之外,我们还可以列举出关于时间不具有流动性的其他理由。由于任何所谓的流动都必须是具有方向性的,没有方向性的流动是无法想象同时也是不可能存在的,因此,如果时间具有流动性,那么这也只能是一种具有方向的流动性;而由于时间不是矢量,因此所谓时间的方向必定是流动着的时间的方向,从

而时间的方向性与时间的流动性互为前提条件，即对时间而言，没有方向性就不可能有流动性，而根据第 1 章节以及上一节讨论得到的结论，我们知道时间不具有方向性，那么时间必定不具有流动性。另外，根据第 1 章 1.5 节的结论可知，由于一切物质的变化过程都具有时间倒流变换不变性，也就是时间的倒流不会造成任何可观察的效应，并且时间的正向流动也无法对任何物质的变化过程产生可以观测到的效应，因此我们不可能借助仪器及相应的实验获得任何关于时间的流动性的信息，也就是说在任何情况下我们能直接观察到，同时确实真实发生着的只能是物质的变化过程总是不间断地从未发生到正在发生再到已经发生过这种物质变化过程不断流变性而非时间的不断流逝。实际上，即使是我们能够想象到的任何具有流动性的对象也都是物质的，而时间这种看不见、摸不着的非物质性的对象其流动是如何可能的以及怎样发生的，则是我们永远无法想象的。由于物质的存在及变化是永恒的，并且任何物质完成其变化过程都需要时间从而都具有时间性，因此时间是随着物质变化的发生逐渐展开而非流动着的，我们真正感觉到的应该是物质变化过程的持续进行，是物质变化过程的时间性而非时间的持续不断地流逝（否则又会得到时间本身具有时间性的结论），时间的流动性因而成为没有意义的、虚构的概念。这也就意味着我们对时间的流动性的知觉来源于对物质变化过程流变性的错觉，并且完全由这种错觉所导致，而所谓的时间的流逝只能存在于我们的想象中，完全是我们想象的产物。实际上，时间具有流动性的观念是将时间等同于钟表指针的不断旋转、等同于太阳的位置在天空中的不断变化……总之，是与物质变化过程持续不断地进行的现象等同起来的结果，是抽去了物质变化过程的具体内容的纯粹持续性。这里需要特别指出的是，即使是精确描述了物质变化过程的物理理论及各种物理方程，同样没有（实际上也不可能）向我们提供关于时间具有流动性的任何线索。我们知道，一般情况下，在物理学中是用标注了原点、单位时间和正方向的时间坐标轴来表示时间的，由于时间坐标轴上的每一个点都与一个确定的时刻相对应，同时由于时间具有连续性，因此任何一个“时刻”的取值范围是区间（$-\infty$，$+\infty$）中的全体实数。根据定义，时间坐标轴上的任何一个点（即时刻）显然都是“静止不动”的。虽然牛顿在其经典著作中提出并清晰描述了（绝对）时间的流动性的观念，但这仅仅是对人类的时间知觉的简单描述，而根本没有任何科学的依据，迄今为止这种观念从来没有也不可能借助数学的语言表达出来，同时没有（而且由于英国物理学家保罗·戴维斯在其著作中所提到的原因）也不可能得到任何实验的证明，也就是说在物理学中根本就没有也不可能有任何关于时间流动性的科学的描述（实际上由于包括数学在内的任何对时间的流动性的描述都会导致悖论的产生，从而关于时间流逝的数学描述同样是不可能的），因此在物理学中，时间总被默认为是静止的、不流动的，特别是在我们的日常语言中用于表征时间流动性

的“过去的时间”、“现在的时间”以及“未来的时间”这些词语在物理学中实际上没有任何意义，这也是许多物理学家(保罗·戴维斯就是其中之一)坚持认为时间的流逝完全是我们人类头脑中的幻觉，是我们语言的混乱所造成的根本原因。由于即使是像物理学这种人类所建立的最贴近现实、最精密完备、功能最为强大的科学体系在描述物质的变化过程中都不需要(同时也无法证明)时间的流动性这一概念，而即便如此，物理学同样能够很好地对几乎所有物质的变化过程进行精确、完善、自足的科学描述，这一点显然是我们的日常语言无论如何都无法做到的。另外需要进一步强调说明的是，从下面第 3 章的讨论我们将知道，任何物理方程甚至我们的日常语言都可以表达为不显含时间参数的形式，从而所有的一切都将归结为物质的变化过程，在这种情况下方向性及流动性完全是(实际上原本就是)物质的变化过程所具有的性质及呈现出的内容，并且已经与时间根本无关，从而所谓的时间的方向性及流动性已经成为完全没有意义的内容。因此，可以说对于描述物质的变化过程而言，时间的流动性并非必需的从而是多余的，同时也是一个虚构的、没有意义的假定，并且毫无疑问地也是由人类对时间的知觉的间接性和模糊性以及日常语言对时间描述的粗放性导致的错误概念。实际上，我们可以列举出足够多的理由来说明时间不具有流动性，但仅仅只有我们直觉(也许应该称做幻觉)上的支持却没有任何包括理论以及实验在内的证据能够证明时间具有流动性，在这种情况下，如果我们仍然继续把时间具有流动性这一观念当做不需要证明就可以接受的公理，并以此作为前提对时间的本质进行论述及思考是绝对不可能获得任何正确、可靠的结论的。综合上面所有的论述，我们可以得到**时间不具有流动性**的重要结论。

既然时间不具有流动性，那么我们所谓的时间流逝的感觉是如何产生的呢？我们应该如何理解意识中出现的时间不断地从过去到现在再到未来这种幻觉？问题的关键在于一切物质的变化过程本身就具有时间性，从而物质的变化过程可以不依赖于时间而自主地发生，这样，即使是否定了时间的流动性也不意味着就因此否定了时间以及物质变化过程的不断进行。而正是由于一切物质的变化过程本身就具有时间性，从而一切物质的变化过程总是表现为从未来到现在再到过去这种变化形式，表现为永恒的流变性。而正是物质变化过程的这种表现形式在我们的大脑中形成的影像，使我们产生了时间不断从过去到现在再到未来流逝(流逝的方向恰好与状态的变化过程的方向相反)的所谓时间的流动性的幻觉，就如因为运动的相对性导致地球围绕太阳旋转这一事实，在一直生活于地球上的人们由于始终都以地球为参照系在意识中必然形成似乎是太阳围绕地球旋转这样的错觉一样，从而时间流逝的观念是人们强加给时间的而实际上并不存在的一种性质。那么我们应该如何理解前面提到的悉尼·舒梅克的冻结星球模型呢？显然，从现代物理

学特别是量子力学的角度看，这种周期冻结的星系在现实中是不可能存在的，只能存在于我们的想象中，但从逻辑学的视角看，这样的星系却是可能的。其实问题的关键在于这三个星系周期性的冻结、复活本身就是遵循严格的周期性的变化过程：冻结→复活→冻结→复活（与我们地球上的一年中春、夏、秋、冬四季的周期性变化完全类似），而即使在每一个星系冻结起来从而星系上所有一切都静止的情况下，这种变化过程仍然在不断进行。首先，在这种周期性变化过程中显然隐含了导致这种周期性变化过程产生的机制，而且即使在这三个星系被同时冻结起来时，这一机制同样在起作用，这种机制完全可以看做是控制这些变化过程周期性进行的“星系钟”；其次，由于一切物质的变化过程都具有时间性，因此这些周期性变化过程同样具有时间性，即从“复活期”过渡到“冻结期”这一过程需要时间，而从“冻结期”过渡到“复活期”这一过程也需要时间。从而这些变化过程的周期性本身就可以作为对变化过程的时间性进行测量的时钟，即使是这三个星系每隔 60 年被同时冻结的情况下，这种周期也在严格地进行，从而使得三个星系上的居民可以在苏醒后知道他们共同被冻结了 1 年，可见这里并不需要也不可能存在脱离三个星系而独立存在的时间流。悉尼·舒梅克在分析过程中显然过分关注星系在被冻结时的静止的状态，而忽略了整个星系的“冻结→复活→冻结→复活”的这一周期性变化过程及其时间性的存在才导致错误的结论。归根结底，我们通常所谓的不断流逝着的时间，从本质上就是抽去了物质对象而从未来到现在再到过去不断进行的、抽象的、想象中的物质变化过程，根本不可能是脱离物质的变化过程从而独自存在的、具有流动性的时间。正如 A. 格留鲍姆所认为的时间的流逝与人的感觉一样是心理的、主观的现象，人们在意识中产生的时间不断流逝的错觉完全起因于不断发生的物质的变化过程，起因于物质变化过程所具有的时间性。这一点与英国哲学家 R. L. 普瓦德万在其著作中涉及的时间的相对主义的观点有类似之处：“相对主义的这种形式断言时间只不过是事件的一个有序排列，每一个单独的时刻等同于同一时刻的所有事件的集合[①]”，而且相对主义者认为：“时间只是对变化的计量，没有变化，就没有时间[②]。”但相对主义却忽略了（或者没有揭示出）物质变化过程本身所具有的时间性，从而没有时间及时间性同样也不可能有物质的存在及其变化。不仅如此，实际上时间的不流动性的观念与当前流行的无时态时间理论也是完全不同的，如英国学者克怀格·卡伦德及拉尔夫·埃德尼在其著作中对此进行了相关的叙述：“时间的无时态理论对一般人来说可能无法理解，但却受到绝大多数（无疑不是全部）哲学家和科学家的喜爱，这个理论的主要思想是：没有变化、没有分

① ［英］R. L. 普瓦德万. 四维旅行［M］. 胡凯衡，邹若竹，译. 长沙：湖南科学技术出版社，2005：29.
② ［英］克怀格·卡伦德，拉尔夫·爱德尼. 视读时间［M］. 张颖，译. 合肥：安徽文艺出版社，2007：21.

支、没有历程，以我们表示空间的方式表示时间[①]”；克怀格·卡伦德及拉尔夫·埃德尼继续介绍：“无时态或‘块宇宙’理论认为，‘过去’‘现在’和‘未来’都是存在的。因此你的人生看上去可能像这样……[②]”也就是说，在无时态时间理论者看来，“过去”“现在”和“未来”都是存在的，但不是存在于同一时刻而是存在于不同的时刻，即分别存在于过去、现在与未来的不同时刻；而在关于时间不具有流动性的观念中，时间虽然没有流动性但物质的变化过程仍然正常发生着，由于任何物质的变化过程都具有时间性，从而时间的不流动性完全不影响物质变化过程的发生，因此，物质变化过程的任何一个状态总是从还不存在的未来到正在呈现出的现在再到已经存在过而现在已不存在的过去，即未来与过去的状态都是不存在的，从而无时态时间理论认为的未来（或过去）的一切事物及其状态是存在的而且存在于未来（或过去）的观点是没有任何意义的，是对存在这一概念理解上的混乱造成的，其实所谓的物质的存在必须而且只能是“现在”的（即存在具有“现在性”），只有物质的“现在”的状态存在着（而且这正是变化的意义所在），但在对物质的变化过程进行描述时常用的方法仍然实用，只不过对这种描述需要进行重新解释。

既然时间不具有流动性，那么我们在进行日常的交流过程中也应该完全可以做到不使用与时间的流动性有关的词语，实际上这种表达方式的确能够实现，只不过相应的表达形式肯定会很古板，人们会感到很别扭、不适应罢了，如英国物理学家保罗·戴维斯在其著作中就有过类似的表述：“仔细考虑充满流动韵味的陈述方式，如：‘仅仅在上周四，气象局预报说周六会放晴，但到星期六，雨下得更大，直至星期天早晨阳光灿烂，我才知道最坏的天气终于过去了。’尽管对这一系列事件所作的不经意描述生动传达出了必要的信息，但其中包含了完全相同的基本内容，虽然更枯燥，但我还是把事件目录罗列如下：星期四：气象局报星期六晴；星期五：雨；星期六：大雨；星期天：晴。注意我自始至终都用现在时态，这是把日期标记与天气状况联系起来的好办法。事实上，表达这种相互关系不必非用动词不可；我们只需看一下日记条目即可明白。我们从这一扼要的描述中所得出的信息要旨与最初的描述完全相同，但在后一种描述中，没有什么‘发生’或变化了。没有日子‘出现’或‘带来’好天气[③]。”反之，即使我们使用了与时间的流动性有关的词语，也不意味着时间因此就具有了流动性，因为时间的性质是不会因为我们的语言表达方式的不同而发生改变的。需要特别强调说明的是，否定时间的流动性并不意味着所有关于时态的语言都不能再继续使用，因为一切事物的变化过程仍然在正常发生着，这些变化过程导致我们人类的大脑中产生的时间具有流动性的错觉并不会因为时间

---

① [英]克怀格·卡伦德，拉尔夫·爱德尼. 视读时间[M]. 张颖，译. 合肥：安徽文艺出版社，2007：35.
② [英]克怀格·卡伦德，拉尔夫·爱德尼. 视读时间[M]. 张颖，译. 合肥：安徽文艺出版社，2007：40.
③ [英]保罗·戴维斯. 关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M]. 崔存明，译. 长春：吉林人民出版社，2002：358.

具有流动性的观念被否定而消失,从而我们的日常语言仍然可以被用于正常的人际间的交流,正如即使哥白尼否定了地心说后因为相对运动在我们人类的感觉上造成的太阳似乎围绕地球旋转这种错觉,使得人们在日常语言中仍然可以使用诸如"太阳从东方升起来了"、"太阳从西边落下去了"等用于描述太阳围绕地球旋转之类的语言,而且在应用层面上把时间看做流动的可以更便于描述物质的变化过程,因为从时间的角度而不是从变化过程本身的角度对变化过程进行描述更便捷。与三百多年前哥白尼提出的太阳中心说导致了人类全新宇宙观的形成类似,时间不具有流动性这一观念也将会对人类全新时间观的形成产生重要影响,并将使以人为中心从而时间不断从过去到现在再到未来流逝的观念被以物质为中心的、事件及其状态不断从还未出现到正在出现直至消失的这样的观点所替代。最后,需要强调的是,由于时间不具有流动性,因此时间无所谓流动的快与慢,从而所谓时间的变慢或停止的说法是没有任何意义的,这样,在狭义或广义相对论中由物质的变化过程(或时钟)变慢或停止现象完全不可能推论出时间变慢或者停止的结论,也就是说在狭义或广义相对论中简单地由时钟变慢现象推论出时间变慢的结论是完全错误的。另外,几乎所有关于时间的哲学论述都是建立在时间具有流动性的基础之上的,因此这些论述也肯定也是有问题的。

2.5.2 未来、现在及过去——一切物质的存在与变化过程的表现形式

上面我们获得时间不具有流动性的重要结论,那么据此我们应该如何理解通常所说的时间不断地从过去向现在再向未来的方向进行流逝的这样一种常识性观点呢?其实在前面我们也提到过,人们通常感觉到的所谓时间的流动性本质上是物质的变化过程的不断进行而不是时间的不断流逝,即所有物质的变化过程总是以从未来到现在再到过去这一方式在不断地进行着。那么未来、现在及过去与物质的变化过程之间究竟存在什么关系呢?我们知道,任何事物的属性都与该事物具有内在的、本质的联系从而永远都会与该事物相伴随,而物质的变化过程不可能总是未来的或者现在的或者过去的,因此物质的变化过程不可能或者具有未来性(即永远处于未来的状态),或者具有现在性(即永远处于现在的状态),或者具有过去性(即永远处于过去的状态),更不可能同时具有未来、现在、过去这三种性质,从而未来、现在、过去不可能是物质的变化过程的性质。由于任何物质的变化过程永远处于从未来到现在再到未来的状态中,永远呈现出从未来到现在再到过去这种形式,因此我们在此提出未来、现在、过去是物质的变化过程的表现形式而非时间的流逝方式。

根据前面第1章第1.1节中的讨论以及科学与哲学中对物质变化的各种定义我们知道,所谓物质变化的本质特征就是物质的已有状态不断消失、新的状态不断

出现或者一个状态不断被另一个状态所替代的现象或过程。如果仅仅从物质变化过程的发生(而不是从处于不同参照系中的观察者对其进行观察,从而不必考虑同时性的相对性问题)这一角度考虑,对于在某一物质变化过程 M 中三个完全不同的从而不可能同时出现或发生的变化状态 A、B、C,这三个状态在该物质变化过程中出现或发生的先后顺序依次是 A、B、C(A→B→C),即状态 A 出现或发生在状态 B 及 C 之前,状态 B 则出现或发生在状态 A 之后及 C 之前,而状态 C 则出现或发生在状态 A 及 B 之后。这样当状态 A 正在出现或发生时,状态 B 及状态 C 则还未出现或发生;而当状态 B 正在出现或发生时,状态 A 则被状态 B 所替代从而已经出现或发生过,状态 C 则仍然还未出现或发生;而当状态 C 正在出现或发生时,状态 B 则被状态 C 所替代从而已经出现或发生过。因此,对于该物质变化过程的其中一个状态如 B 而言,当状态 A 正在出现或发生时,状态 B 则处于还未出现或发生的情况;而当状态 A 被状态 B 所替代从而状态 B 呈现出来时,状态 B 则处于正在出现或发生的情况;而当状态 B 被状态 C 所替代从而状态 C 呈现出来时,状态 B 则处于已经出现或发生过的情况。由于上述对物质变化过程 M 的讨论完全适合于任何一个物质变化过程的情况,这也就意味着现实中任何物质的变化过程中的任何一个状态总是表现为"还未出现(或发生)或正在出现(或发生)或已经出现(或发生)过"这三种情况之一而不可能有其他情况,即如果在某一物质变化过程中的某一状态处于还未出现或发生的情况,那么这一状态就不可能同时处于正在出现或发生及已经出现或发生过的状态;如果某一状态处于正在出现或发生的情况,那么这一状态就不可能同时处于还未出现或发生及已经出现或发生过的状态;如果某一状态处于已经出现或发生过的情况,那么这一状态就不可能同时处于还未出现或发生及正在出现或发生的状态。特别的,如果我们把上面关于物质变化过程 M 中三个完全不同的变化状态 A、B、C 的发生情况的讨论应用于该物质变化过程的任何一个状态(如状态 B)的出现或发生情况的讨论,那么我们就可以得到结论:物质变化过程中的任何一个状态的出现或发生的情况总是表现为,从该状态还未出现或发生到该状态正在出现或发生,再到该状态已经出现或发生过的顺序进行而不可能有其他出现或发生的顺序。

对于物质变化过程中某一状态还未出现(或发生)的情况用通俗的语言表达则具有还未到来之意,可以简称为"未来",这也就意味着我们可以把由所有物质变化过程中还未出现的状态或发生的事件构成的集合称做"未来";另外,对于物质变化过程中某一状态已经出现或发生过的情况用通俗的语言表达则有已经过去之意,可以简称为"过去",从而我们可以把由所有物质变化过程中已经出现的状态或发生过的事件构成的集合称做"过去";而对于任何当下我们正在关注的这一时刻某一物质变化过程的某一状态正在出现或发生的情况用通俗的语言可以表述为当前

正在出现或发生，可以简称为“现在”，从而我们可以把我们当下正在关注的这一时刻发生的所有物质变化过程中正在出现的状态或发生的事件构成的集合称做“现在”。实际上，作为有感觉、有意识的人类，我们不可能仅仅以一个旁观者的身份观察我们周围正在发生的一切，而是永远参与甚至亲历着我们身上以及周围始终处于正在发生（或正在进行）中的一切物质的变化过程，这样，只要我们存在于所在的宇宙中就永远处于“现在”之中。正如德国哲学家克劳斯·黑尔德在其著作中所描述的：“因此我们对感性世界的基本经验是：我们总是经验到世界的‘esist’。运动着的届时的实存，作为在场者，作为‘当下’存在的东西，总是与我们相遇。这使得我们有权利在每一时刻说‘现在’。而且，对亚里士多德而言，总是‘现在’，总是有当下的发生进程，构成了我们对时间的意识。对他来说，时间的经验，从根本上是对现在的经验。从根本上，我们知道时间，因为我们总是可以说‘现在’[①]”。显然，在克劳斯·黑尔德的叙述中所说的“现在”与我们对其所赋予的意义完全不同，我们所说的“现在”是物质变化过程的表现形式的其中之一，而克劳斯·黑尔德——同时也是亚里士多德的观点——所说的“现在”完全指时间的特殊的分割点，是时间的最重要的组成部分。需要指出的是，只有对于具体的物质变化过程而言我们才能谈论其某一具体的状态还未出现或正在出现或者已经出现过等详情，而由于物理学理论是对物质的变化过程的抽象的描述，因此在物理学中不可能有“未来、现在、过去”这样的概念。由于一切复杂的物质变化过程都具有不可逆性，从而未来、现在、过去是有明显区别的，正如美国物理学家费曼所说：“因为即使没有作过实验，我们对于过去和未来的内心体验也是完全不同的。我们能够记得过去，但我们不能够记忆未来。我们对于什么会发生的意识，是与对于什么可能已经发生的意识不相同的。从心理学上看，过去和未来是完全不同的，我们具有记忆和表面上的自由意志，这指的是我们觉得我们能够做些什么去影响未来，但我们当中没有人，或者只有很少人相信我们能够做点什么事情来影响过去。懊悔，遗憾，希望，等等，所有这些词语都明显地把过去和未来完全区分开来[②]。”显然，在上述对物质变化过程的通俗语言的表述中，有意识的人作为观察者或亲历者总是被看做静止不动的，而被我们观察的变化过程的一个个未来的状态仿佛在不断地向我们飞奔而来，这些状态只有到了我们眼前时才成为正在发生的，从而能被我们的感官所感知到并在我们的记忆中形成痕迹，随后这些状态在我们眼前消失、匆匆离我们而去并成为永远的过去，可见，未来（还未发生的）、现在（正在发生的）以及过去（已经发生过的）都是物质在其变化过程中向我们所呈现出来的状态。需要指出的是，还未发

① [德]克劳斯·黑尔德.时间现象学的基本概念[M].靳希平，孙周兴，张灯，柯小刚，译.上海：译文出版社，2009：41.

② [美]R·P·费曼.物理定律的本性[M].关洪，译.长沙：湖南科学技术出版社，2012：110.

生的事件并非存在于任何"未来"时刻，而是处于还未发生的状态，仅此而已；而已经发生过的事件也并非存在于"过去"的某一时刻，而是处于已经消失的状态，仅此而已，而正因为如此，我们当下(即现在)的选择才能够对未来(而非过去)产生影响并因此改变未来的进程。如果把物质的变化过程与所谓的时间坐标结合起来进行描述，上述叙述可以有更清晰的表述形式。对任一时刻 t 而言，所有在该时刻未出现或发生物质变化过程的状态(或事件)构成对该时刻而言属于"未来"的集合(或内容)，即所谓的"未来"并非某一时刻还未到来，而是变化过程的某一状态还未到来；所有在该时刻正在出现或发生的状态(或事件)构成对该时刻而言属于"现在"的集合(或内容)，即所谓的"现在"并非某一时刻在该时刻正在到来而是变化过程的某一状态在该时刻正在出现或发生；而所有在该时刻已经出现或发生过的状态(或事件)构成对该时刻而言属于"过去"的集合(或内容)，即所谓的"过去"并非某一时刻已经过去，而是变化过程的某一状态已经出现或发生过；可见未来、现在、过去具有相对性而无绝对性，只有相对于相应的时刻而言所谓的未来、现在、过去才是有意义的。而正是由于任何物质的变化过程一直在不断地进行着，所以在某一时刻正在出现或发生的状态在下一时刻就可能成为已经出现或发生过的状态从而成为过去，而在该时刻还未出现或发生的状态在下一时刻就可能成为正在出现或发生的状态从而成为现在。这也就是说，随着时间的流逝物质变化过程的任何一个状态都可以在不同的时刻从未来成为现在再成为过去，即表现为从未来到现在再到过去的变动形式，总是处于并因此向我们呈现出或者还未发生、或者正在发生、或者已经发生过的状态，这也就是说未来、现在、过去是物质变化过程的任何一个状态的表现形式。

以上我们提出的对"未来"、"现在"、"过去"这几个概念的使用方法显然与人们的常识性观念(甚至包括海德格尔对时间的观念，如海德格尔在其《存在与时间》中将未来、现在、过去看做时间性到时的样式，看做是时间的内容)是完全不同的。人们通常的观念是，过去、现在、未来是对时间之河的一种最一般的分割形式而非物质的变化过程的任何一个状态的表现形式。对此，叔本华在其著作中对时间与空间的各种性质的论述中就有过总结性的叙述："时间有三个方面，过去、现在和未来，它们构成了两个方面和一个中性点"①。实际上这种观念贯穿于人类的日常语言中，如在英语中用各种时态表示不同时间条件下的行为方式，英语语法中有八种常见的时态，即将来时、现在时、过去时、现在进行时、过去进行时、现在完成时、过去完成时及过去将来时等，其中将来时、现在时、过去时是在时间坐标轴上的三种最基本的时态，对时间坐标轴进行更为细致的分割的其他时态则在这三种时态的

① 吴国胜.时间的观念[M].北京：中国社会科学出版社，1996：163.

基础上使人们对时态的表达更为丰富、细腻,除英语之外的其他重要语系(如汉语)对在时间中发生的事件都有类似的表达方式。现在我们来看看对于物质的变化过程中的任何一个状态"总表现为从该状态还未出现或发生到该状态正在出现或发生再到该状态已经出现或发生过"的表现形式在我们的日常语言是如何表达的。如对于从美国纽约出发到中国上海的航班,航班于北京时间上午9时30分出发,到达上海的时间是北京时间下午8时整。如果当前的时间是北京时间2012年3月22日上午10时30分,那么乘务员用日常语言播报该次航班达到上海的情况应该是"该次航班将于今天下午8时整到达上海"。而当该次航班在北京时间2012年3月22日下午7时59分到达上海的上空时乘务员用日常语言的播报应该是"该次航班现在正在上海的上空飞行并即将到达飞行的终点"。而在北京时间2012年3月22日下午8时1分,该次航班到达上海机场后乘务员用日常语言的播报应该是"该次航班现在已经到达上海机场"。又如天气预报对未来24小时的天气预报是:"未来24小时内××地将有小到中雨,最大风力3～4级"。而在该预报时间范围内的某一时刻某地真的下起小到中量的雨时,在这一时刻该地的观察者可以说"现在正在下小到中雨"。而当雨过天晴后1个小时,我们可以说"在1个小时前××地曾经下过小到中雨"。可见,我们的日常语言中对类似情况的描述时常常会用到未来(或将来)、现在、过去这些词语来说明相对于我们正在关注的这一时刻某一事件发生的时间是早于、晚于或者于此同时发生的情况。显然,在这种观念中所谓的"现在"是时间的一个特殊的分割点,该分割点把整个时间坐标轴分割为过去与未来,而且时间的任一时刻永不停顿地从未来向现在再向过去流逝。而从这种时间观念中导出的著名的麦克塔格特悖论几乎摧毁了整个时间概念的基础,通过上面的分析我们知道,该悖论完全可以通过引入"时间是不流动"的这样一个观点而加以消除,因此麦克塔格特悖论反而从一个侧面证明了"时间的任一时刻永不停顿地从未来向现在再向过去流逝"的观念是不正确的,这也就意味着从未来到现在再到过去是与时间本身无关的内容,确切地说是物质的变化过程中的任何一个状态的表现形式。

正是由于物质的变化过程具有时间性,从而物质的变化过程才表现为逐渐从未来(还未发生)到现在(正在发生)再到过去(已经发生过)这种形式,而如果所有物质的变化过程不具有时间性,那么这些物质的变化过程都将在一瞬间完成,即所有物质将同时具有未来、现在、过去所有这些状态,这样,物质的未来、现在、过去的状态就不可能区分出来,从而物质的变化过程不可能表现为从未来到现在再到过去这种形式而是同时具有未来、现在及过去这种性质。因此,可以说物质的变化过程具有时间性是物质的变化过程总是表现为从未来到现在再到过去这种变化形式的前提条件,而物质的变化过程总是从未来到现在再到过去这种变化形式是物质

的变化过程具有时间性的表现形式。而正是由于物质的变化过程具有时间性，物质的变化过程而非时间才必然会显现出从未来到现在再到过去这种唯一的表现形式，而正是由于物质的状态不断地呈现出从未来到过去再到未来这种方式，才导致我们在意识中产生时间是不断流逝的幻觉，同时也使得我们只能记得过去的事情，甚至过去几十年的事也会在我们的大脑中留下记忆，而由于未来的事情还未发生，因此我们无法亲身经历，从而也就不可能在我们的大脑中产生关于未来的记忆。同样的，由于过去的事情是已经发生过的，从而不能以任何方式加以改变；而未来的事情还未发生，从而我们可以对导致其发生的条件施加影响并进而对还未发生的事情产生影响。因此，我们可以下结论说物质的变化过程总是表现为从未来到现在再到过去这种形式，而且这种表现形式是物质的变化过程具有时间性的有力证据。

2.6 时间的维度

时间的维度是表征时间的拓扑(即整体)性质的一个最重要的参数，也是我们理解时间的本质问题的一个关键因素。自从伽利略在其运动学的研究过程中以及牛顿在其《自然哲学的数学原理》中分别将时间概念引入物理学，特别是法国科学家拉格朗日以及达朗贝尔分别将一维时间的概念引入经典力学的系统表述，直至当代爱因斯坦的狭义及广义相对论以及量子力学的理论体系的出现为止已有三四百年的历史，时间的一维性一直都是作为一个不需要证明的假设被不假思索地应用着，而且在科学史上很少有人对于时间的一维性的假设提出过质疑，更没有人对这一假设的合理性进行过深入的思考，有人甚至会认为这种思考不会有任何结果因而完全没有意义，如汪天文博士在其著作中的叙述就表达了类似的观点："直到现在为止，时间的一维性(数学上有多维和分形空间的证明，但是仍然不能给现实空间的三维性一个可信的证明)仍然是一个基本假设。这种假设就其内涵来看，永远得不到逻辑的证明，因为时间本身是超越逻辑的概念，同时逻辑又是非时间性的东西。既然时间的维度是一种认定，是一种永远得不到证明的假设，那么关于时间究竟有几个维度的讨论就失去了理论和现实的意义[①]。"实际情况的确如汪天文博士所说，时间的一维性在物理学中是以基本假设的形式引入的，为了便于对物质的变化过程进行数学的描述，在物理学中就把不断流逝并且连续变化的每一个时刻都连接起来从而构成一条时间坐标轴，并由此定义该时间坐标轴的维度是一维的，但从未有人认真思考过把一维的时间坐标轴作为一个定义引入物理学中是否合理的问题。如经典力学、麦克斯韦电磁理论以及热力学理论对物质的变化过程进行

---

① 汪天文.时间理解论[M].北京:人民出版社,2008:125.

描述时都是直接引入一维时间的概念，特别是爱因斯坦的狭义相对论及广义的相对论中则直接将一维时间与三维空间整合为四维时—空，显然，这些理论在引入一维时间概念是都没有对其进行过任何进一步的分析。也许正是因为感觉时间的维度无法从理论上加以确定，因此有学者就将时间的一维性的假设与空间的三维性进行简单的类比，提出了多维甚至分数维（即分形）时间的概念，但这些概念充其量也仅仅只是对一维的时间维度所作的简单的除法运算，并非真正建立在对时间的本质进行过深入思考的基础上，也就是说这样的时间概念纯粹是想象的、没有任何实质内容的概念。也许时间的一维性这一假定真的无法给出逻辑上的论证，但是这并不妨碍我们根据维度的概念以及假定时间具有不同的维度的情况下物质的存在及其变化会有怎样的不同这一角度对其进行分析。显然，物质存在于其中的世界的时间维度对物质的运动方式的影响是至关重要的，设想有两个空间维度完全相同的世界，其中一个世界的时间维度是一维而另一个世界的时间维度是二维，那么在一维时间的世界里存在的物质与在二维时间的世界存在的物质运动方式必然完全不同，也许在一维时间的世界里物质的运动及变化都将是不可能的，或者也许物质完成其变化过程可能不需要任何时间，而这与一维时间的世界中的情况是完全不同的。因此，对于我们生活在其中的世界的时间的维度究竟是多少这一问题的确是值得我们考虑的问题，而要解决这一问题，我们必须结合数学及物理学中关于空间维度的概念进行详细的分析。

维度又被称做维数或自由度，在物理学中是指独立的时空坐标的数目或物体在空间中自由运动的程度。虽然维度在物理学中是一个非常重要的概念，但迄今为止在物理学中对于这样一个重要概念还没有任何严格的数学定义，相应的定义基本都是采用对点、线、面进行简单移动的操作方法进行的：把一个点看做是零维空间，把一个点连续移动形成的一条直线是一维空间，把一条直线沿其垂直方向连续移动形成的一个平面是二维空间，把一个平面沿与之垂直的方向连续移动则形成三维空间，等等。实际上不同的科学家对时间维度的定义内容可以完全不同，具有相当的随意性，如英国哲学家普瓦德万在其著作中则是这样给维度概念下定义的："一个维度，在最宽泛的意义上讲，就是事物的某一给定的性质只能沿一个方向变化，所以我们能够说音调、密度、色调或温度是一维的[①]。"根据维度的定义可知，构成我们周围真实的空间的维度是三，即上—下、前—后、左—右，如我们可以在上下、东南及西北方向运动，除此之外的其他方向上的运动需要用三个正交的数轴构成的所谓的直角坐标系所确定的坐标来描述。在物理学中，时间是除以上三维空间之外的第四维，与三个空间维度不同的是它只有一维，且只能朝一个方向流逝。

① [英]R·L·普瓦德万.四维旅行[M].胡凯衡，邹若竹，译.长沙：湖南科学技术出版社，2005：71.

显然，用对点、线、面进行移动这种操作方法最多只能得到三维空间的直观定义，而要得到三个维度以上的空间的概念，只能而且必须借助数学方法才能实现。如为了调和广义相对论与量子力学之间的矛盾，有些物理理论提出我们存在于其中的宇宙实际上应该有更多(如可以分别有10、11甚至26个等)的维度，但是这些较三维空间多出来的附加的维度所描述的是亚原子尺度的宇宙，相应的定义就是借助数学的方法进行的。在几何学及拓扑学等数学学科中维度则被认为是描述构成某一种空间的点集中的任何一个点所需要的独立变量的个数，实际上在数学中往往把维度与变量的个数等同起来，如在数学中用一个常数描述零维空间中的一个点，用1个变量x(x的取值范围是所有实数)表示并描述一维空间中的任何一个点，用2个变量(x_1,x_2)(其中x_1,x_2的取值范围是所有实数)表示并描述二维空间中的任何一个点，用3个变量(x_1,x_2,x_3)(其中x_1,x_2,x_3的取值范围是所有实数)表示并描述三维空间中的任何一个点，用n个变量($x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n$)(其中$x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n$的取值范围是所有实数)则可以表示并描述n维空间中的任何一个点。显然，n维空间中的任何一个m($m\leqslant n$)维曲面经过拓扑变换后其维度仍然是m，这就是说维度是曲面经过拓扑变换后永远不变的性质，例如，如果我们把不同的黎曼空间看做是相互之间所进行的拓扑变换的结果，那么维度显然就是不同的黎曼空间本身的永恒不变的性质。仿照空间维度的定义，自牛顿力学创立开始、特别是经典力学过程中，时间作为一个维度的概念被引进了物理学，正如爱因斯坦在其相对论著作中所说："当拉格朗日在《分析力学》中用四维解析几何的形式阐明古典力学原理之后，当达朗贝尔在《百科全书》的量度一文中把时间看成是第四维的时候，他就已经把第四维的概念引入科学了①。"到了20世纪初，法国科学家H.庞加莱、德国数学家H.闵科夫斯基及德国物理学家A.爱因斯坦等通过研究发现要协调光速不变原理与相对性原理之间的关系，必须假定时间维度不再是独立于空间的一个维度，而是必须与三维空间一起构成不可分割的一个整体，即构成所谓的四维时—空。在爱因斯坦建立狭义及广义相对论并引入所谓的四维时—空过程中，爱因斯坦同样没有对四维时—空中时间的维度问题进行过任何深入的讨论，爱因斯坦直接从牛顿力学中把一维时间的概念继承下来，并结合光速不变原理、狭义相对性原理以及等效原理，把一维时间的概念整合到四维时—空概念中构成所谓的四维时—空乃至四维黎曼弯曲时—空。

虽然物理学及数学对空间的维度都给出了相应的定义，但这些定义都不能够将空间与时间严格的区分开来，而我们在此前对时间的各种性质(如时间的客观性、可感知性及可测量性，时间的连续性及均匀性，时间的测量值具有相对性，时间

---

① [美]阿尔伯特·爱因斯坦.相对论[M].易洪波，李智谋，译.南京：江苏人民出版社，2011：131.

不具有方向性，时间不具有流动性等）的讨论中也未发现时间所具有的任何可以与空间明显区别开来的性质，这些性质反倒是空间也同样具有的。但是直觉告诉我们空间与时间显然有明显的区别，物理学家对这种区别不可能熟视无睹，下面汤甦野教授在其著作中的生动描述可看做是空间与时间之间存在明显区别的很好说明："传说在一片茂盛的森林中，生活着一群生命短暂而又极其聪明的小精灵。其中有一些小精灵对自己周围的世界产生了好奇心，有些小精灵看到了种子落地，而另一些小精灵则看到了地上的种子萌出了绿芽，但是，在他们看到一个完整的故事之前，生命在一瞬间就已经结束。这些小精灵的后代，其中有些记住了先辈们看到的事情，继承了先辈的好奇心，又看到了绿芽变成了一棵小树，就这样一代又一代……终于，在后来的某一天，有了一个种子如何落地、发芽……直至某一天秋叶飘落，又一颗种子落地，以及其间四季更替，发生了许多事情的完整故事。这一传说形象地说明了人类在认识自然时的处境。惠特罗（G. J. Whitrow）曾经这样评述过：'空间似乎是整个地出现在我们面前，而时间则是一点一滴地到来，这一事实对于物理学家的影响是极其深刻的，过去的事情必须借助模糊的记忆来重现，而未来又被掩蔽着使我们无法看到，只有现在呈现在我们眼前……'巨大的空间尺度又使得时间的次序相互重叠[①]。"在以上叙述中森林里的所有树显然同时呈现在所在空间区域，而其中每一棵树从种子落地到发芽再到长成小树再到成长为参天大树的全过程则不可能同时呈现、瞬间完成，而是必须要经历一个过程，需要一定时间，由此可见空间与时间之间存在的明显区别。虽然这里的描述是基于人类关于时间具有流动性这一错误的观念，但至少说明时间与空间之间的区别是肯定存在的，这一点就连建立了狭义及广义相对论理论体系并最终导致所谓的"块宇宙"观念的爱因斯坦也是认同的，如爱因斯坦在其著作中所说："四维事件连续统的不可分离性(non－divisibility)并不表示空间坐标与时间坐标是等价的。恰恰相反，我们必须牢记，物理上对时间坐标的定义完全不同于对空间坐标的定义。当令(22)式和(22a)式相等时，就定义了洛伦兹变换，这进一步表明了空间坐标与时间坐标所扮演的角色是不同的，因为 Δt^2 项的符号与空间项 $\Delta x_1{}^2, \Delta x_2{}^2, \Delta x_3{}^2$ 的符号相反[②]。"爱因斯坦之后的部分相对论物理学家在爱因斯坦开创的道路上走得更远，甚至认为时间与空间之间可以没有任何区别，整个宇宙就是一个没有任何变化的四维"砖块宇宙"，但这种观点并不能真正消解时间与空间之间在我们的感觉经验中存在的明显区别。显然，这种区别不能够从我们前面讨论过的几种时间的性质中反映出来，我们认为应该而且只能从维度的定义，特别是从时间与空间的维度中反映出

---

① 汤甦野. 熵：一个世纪之谜的解析[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，2004：212.

② [美]阿尔伯特·爱因斯坦. 相对论的意义[M]. 郝建刚，刘道军，译. 上海：上海科技教育出版社，2001：27.

来。下面我们就对维度的定义进行简单的分析。

所谓的一个空间的维度如一个由长、宽、高三个参数构成的三维空间具有两重含义:其一是一切存在于该空间维度中任何一个点上的任意一个物体都可以在该空间维度中任何方向上自由地运动,除非遇到另外一个占据着某一空间位置的物体,原则上不会有任何阻碍;其二是该空间维度上的任何一个点都允许任何一个物体存在于其上。简单地说,所谓一个空间维度就是物体能够在其中存在并自由运动的场所。即具有维度的空间本身就是物质变化或运动的背景、场所,从而原则上可以独立于物质及其变化过程而存在,虽然我们无法想象空无一物的空间是如何以及以怎样的形式存在的,并且如果空间中不存在任何物质,那么空间的存在就不可能以任何方式得以证明从而这样的空间也不可能有任何意义。而由于人们通常将时间看做一条维度是"一"的河流,宇宙中存在的所有物质都在这一河流中以从未来到现在再到过去的方式变化着,因此,这样的时间同样也可以独立于物质及其变化过程而独立存在。需要特别指出的是,空间维度的概念原则上并不禁止任何物体在相应的空间维度中以无限大的速度自由运动,也即一个空间维度允许任何一个物体在该空间维度上的所有(数目无限大的)点上同时出现或者在空间中某一点上消失的同时可以在与之相距非常遥远距离之外的另一点上出现,这就意味着物体可以实现其在该空间维度中以任意的速度以及被该空间维度所允许的任意方向上,以及从该空间中的一个点到另一个点的自由运动,显然,要满足这一要求,该空间维度中的所有点必须同时存在,也即构成这一空间的所有点的集合是实无限而不是潜无限,唯有如此物体才能够在该空间维度上进行没有任何限制的、自由的运动。从而,构成空间的所有点的同时存在是该空间成为一个维度的最重要的前提条件,确切地说是充分必要条件。前面我们提到过,维度概念是拓扑学中的一个重要概念,即对空间中一些图形进行整体性的挤压、拉扯等拓扑变换后不发生变化的性质,比如将一维的直线弄弯从而变成曲线后其维度仍然是一维,又比如将一个二维的圆锥面经挤压、拉扯而变成一个球面后其维度仍然是二维,即在相应的变换过程中图形的维度并没有发生变化,也即维度是图形在拓扑变换过程中不变的性质。显然,不论是直线还是曲线或者不论是圆锥面还是球面,对这些图形从其中一种变换成另一种所进行的都是整体变换,而且在相应的变换过程中我们一直都是将这些图形作为整体看待的,即这些图形上的所有点都被看做是同时存在的,这种操作性定义显然可以推广到整个空间的情况。因此,关于一个变量对应于一个维度的定义隐含这样一个前提条件,即假定该变量在其取值范围内的所有值作为一个整体同时存在并构成一个集合,任何一个维度都是作为一个整体呈现在我们面前的,即维度是一个整体性的概念,这就意味着任何一个维度上的所有点是同时存在的,确切地说在任一时刻任何一个维度上的所有点都是同时存在的。如数学中

对 n 维空间的定义就隐含了这样一个假定，即空间中的所有点在任一时刻是同时存在的；实际上，在物理学中对时间的定义其实也隐含这样一个假定，即时间坐标轴上的任一时刻都是同时存在的，从而时间坐标轴实际上被人们看做是一条作为一个整体存在而不是正在逐渐生成的连续不断的直线（如若不然人们只能看到不断从过去向现在再向未来这一方向移动、变化的一个点——时刻——而不会看到一条连续不断的时间坐标轴），这样一来物理学家们就可以方便地在时间坐标轴上的任何一个时刻随意地对相应的物质变化过程进行详细的研究，从而物理学中的时间变量被认为是与空间完全类似的一个维度，这种情况常被人们称做时间的空间化，正是基于这一认识人们才认为时间可以作为一个独立于一切物质及其变化而存在的实体——时间之河，从而使得物体在时间维度上可以像在空间维度上一样自由地从时间坐标轴上的一个时刻移动至另一个时刻，即所谓的时间旅行，也正是在此意义上时间旅行才被认为具有可能性。可见，维度的概念与物体在其中自由运动或从一点到另一点的自由出现之间存在密不可分的关系，根据我们对空间维度的理解可以有如下定义：如果一个由点构成的集合具有连续性，而且构成该集合的所有的点（该集合的点的个数是无限的）作为一个整体同时存在，即构成该集合的点的个数是实无限而不是潜无限的，那么该集合就构成一个维度。

这就是说作为一个维度，首先它必须是由点构成的集合，其次构成该维度的所有点的集合必须是已经完成了无限（即实无限）的而非处于不断构造过程中（即潜无限），也就是说构成该维度的集合中所有点是同时存在的，否则该空间的维度就是零。正如前苏联哲学家 A. M. 莫斯杰巴宁柯在其著作中所说："如果空间由有限的（或数量可计算的）点所组成，那么它的维数原来等于零。（由于点的维数等于零，所以有限数量或数量可计算的点的维数原来也等于零。）分立的时间和空间一样，也将具有零维[①]。"根据这一定义，我们周围空间的长、宽、高三个方向显然构成三个维度，正是由于三维空间中的所有点在任意时刻都是同时存在的，这才使得用于研究空间的结构及性质的几何学是超越时间、完全静态的学科，而仅仅当几何学应用于物理学中，特别是微分几何用于引力场中的情况下相应的空间才成为随时间发生变化的结构。显然，这一关于维度的定义与当前数学及物理学中关于空间维度的概念的含义是完全不同的，当前物理学或数学中关于维度的定义太宽泛、随意。将这一维度的定义推广到物理学中的空间维度，即是说原则上任何一个物体可以被放置在该空间维度的任何一个点上，也即空间维度是物体在其上任意点上存在、驻留并自由运动的场所。显然，这一关于空间维度的定义同样可以用于时间

① ［苏］A. M. 莫斯杰巴宁柯. 宏观世界、巨大世界和微观世界的空间和时间［M］. 王鹏令，陈道馥，译. 北京：中国社会科学出版社，1985：150.

概念。我们先假定时间具有流动性，即时间坐标轴上所有的时刻都会不断地从过去向现在再向未来流动，这也就是说在任一时刻时间坐标轴上有且只有一个点存在着，由于时间坐标轴上的所有的点并不同时存在，从而根据维度的定义可知时间坐标轴不是一维的而是零维的。另外，根据第 1 章 1.5 节中的结论，由于任何描述物质的变化过程的物理方程都具有时间倒流变换不变性，从而时间的正方向与负方向对物理方程而言没有任何区别，对物理方程有意义的只是时间的绝对值增大的方向，也即时间的正负号没有任何意义，确切地说只有时间的绝对值（即数值）有意义，这就意味着时间不具有流动性，从而时间不可能独立于物质及其变化过程而存在，这也就意味着时间不可能具有一维性整体结构。因此，可以说时间仅仅只是一种绝对值（一种类似于距离或长度的量），而并非由点（或时刻）的集合构成，物理学中将时间用时间坐标轴表示仅仅只具有方法论意义；另外，如果假定时间是一个维度，那么时间维度包括时间维度上所有时刻就应该以一个整体的形式独立于物质及其变化过程而存在的实体，而根据前面所进行的各种分析以及后面要讨论到的关于时间的本质的定义我们知道，时间是物质的存在及变化过程的本质属性而非独立于物质的变化过程而存在的实体，确切地说时间隐含在物质的存在及变化过程中，如果宇宙中的物质全部消失则时间也随之消失，时间的这一特征与空间完全不同，因为即使宇宙中的物质全部消失空间同样还可以存在，从而时间不可能是一维的，因此可以说时间的维度只能是零，即一维时间是人们想象出来的时间维度、一个赝维度，是一个纯粹描述物质的变化过程的时间性的参数而非可以随意取值的所谓的自变量，这就是不存在所谓的时间几何学的真正原因，从而在物理学中把时间用一条直线（即时间坐标轴）表示并假定该直线上的所有点（时刻）是同时存在的从而具有一维性特征这一做法仅仅是为了数学上处理问题的方便，这也就意味着相对论中的所谓四维时—空其实是三维空间，狭义及广义相对论中所谓的四维时—空结构完全是虚构的，只具有方法论意义。这一结论与当前被人们普遍接受的观点完全不同，充分反映了时间与空间之间的最大区别。用同样的方法还可以证明诸如音调、密度、色调或温度等物理量的维度也是零，因为这些物理量在每一时刻的量值并非同时存在，虽然我们可以将这些值在每一时刻的值都记录下来并画出它们的变化的曲线，从而把曲线上的所有点看做是同时存在的，但实际情况并非如此。由此我们可以得到诸如时间、音调、密度、色调或温度等物理量的维度是零的结论。

第 3 章

时间与物质的存在及变化过程之间的关系以及时间的本质

所谓时间的本质即时间区别于其他事物的最基本的特征，或者通俗地说是对时间到底为何物这一问题的明确答案。通常人们对于时间的本质的理解概括地说可以划分为两大类：一类观点认为时间是客观的，因此具有客观性；而另一类观点则认为时间是人类主观意识的产物，从而具有主观性。此前我们详细讨论过物质的变化过程的性质及时间的性质，从中认识到由于时间及其各种性质不可能被我们直接感受到，必须而且只能借助物质的变化过程的各种性质才能表现出来，从而物质的变化过程的各种性质与时间的性质之间存在密切关系。另外，在这些讨论中我们涉及了关于时间的诸多方面的内容，而在进行这些内容的讨论之前实际隐含了我们已经知道时间的确切含义的假定，正是在这一前提下我们进行了前面的一系列论述。对时间的本质的讨论自两千多年前人类开始进行哲学思辨时就一直是哲学家们考虑的最主要的内容之一，而自 17 世纪牛顿力学创建以来时间则成为物理学中最重要的概念之一，特别是物理学中几乎所有描述物质变化过程的方程乃至微分方程都必须借助于时间概念才能真正得以建立，时至今日时间已经成为几乎所有自然科学乃至人们日常生活中最为普遍的一个概念。但对于“时间到底是什么”的问题迄今为止我们确实没有得到明确的答案，而且这本身就是一个自有人类文明以来几乎所有的思想家都试图搞清楚但至今也没有任何人给出确切表述的问题，这一问题是如此得艰深、如此得难以解答，以至于现代的学者与思想家在回答这一问题时的状况与当年伟大的圣·奥古斯丁在思考这一问题时的状况完全一样：“什么是时间？如果没有人问我，我知道。可是当我想向问我的人解释时，我坦白我不知道”。但是对这一问题的讨论是我们已经无法回避的，因为如果不能真正回答时间的本质究竟是什么的问题，那么我们前面所进行的所有讨论都将是不完整的，并且这些讨论将失去根基、或者我们根本不知道在谈论什么。但我们前面所有的讨论实际上丰富、完善了我们关于时间的认识，并且通过前面的讨论我们自以为纠正了到目前为止人类在思考时间问题时所出现的对时间的诸多错误的理解，特别是狭义相对论及广义相对论中关于时间的相对性的，以及热力学第二定律关于时间的方向性的错误解释对时间的本质的理解所造成的困难，使我们真正认识到迄今为止人们对时间本质的理解很大程度上是基于这些错误的认识基础之

上，而正是由于这些认识使得人们不可能正确地理解时间的本质。通过前面章节的讨论我们深刻地认识到时间与物质的变化过程具有密切的关系，时间不可能脱离物质的变化过程而独立存在，而我们关于时间的本质的所有讨论都必须以此为前提。下面我们就在此基础上试探性地讨论关于时间的本质这一人类至今仍然没有很好地理解的问题。

3.1 时间是密切关联而又不同于物质的存在及变化过程的对象

前面两个章节我们分别详细地讨论了物质的变化过程及时间的性质，并且知道任何物质的变化过程不可能在瞬间完成，即任何物质的变化过程都具有时间性；而由于时间完全不同于物质实体并且没有流动性，因此时间也不可能脱离物质的变化过程而独立存在，特别是从第1章讨论过的内容可见，物质的存在及其变化过程具有的最一般性质都完全涉及了时间性及时间，从而时间与物质的变化过程之间具有密不可分的关系。由于一切物质的变化过程都具有时间性，因此当任何一个物质的变化过程逐渐展开时必然会经历一段时间（我们无法想象——而且实际上也根本不可能存在——某一个物质的变化过程在逐渐展开时可以不需要时间），即任何一个物质的变化过程都不可能在瞬间完成，从而变化过程离不开时间；同样的，脱离宇宙空间中的物质对象而独自进行的所谓的时间的流逝不会对宇宙空间以及其中的物质对象产生任何有意义的影响，我们无法想象、实际上也不可能存在这种能够脱离物质对象独立进行的所谓的时间的流逝，而当我们在大脑中想象这种独自在宇宙空间中发生的时间“流逝”的现象时，我们实际上是在利用体内的生物钟对并没有发生的所谓流逝着的时间进行计时并感知着相应的计时过程，而这同样离不开物质的变化过程。时间以及与之相关的物体的运动速度等概念是人们通过对物体运动过程中存在的数量关系的分析得到的，当人们将时间概念从物质的变化过程中抽象出来以后，反映物质的变化快慢的速度概念立即成为必要的，实际上任何关于时间的概念及测量都无法脱离物质的变化过程而实现，而且必须在物质的变化过程中才能获得明确的意义。也即时间不可能脱离物质的变化过程而独立存在，同时与物质的变化过程之间具有密不可分的关系。

虽然如此，但直觉告诉我们时间显然与物质的变化过程完全不同，这一点从前面讨论过的内容可以清楚地认识到。虽然时间与物质的变化过程之间具有密不可分的关系，并且时间是完全不同于物质变化过程的对象这一点在现在看来是再明显不过的事实，但是将时间概念从物质的变化过程中抽象出来进而将时间作为完全不同于物质的变化过程的对象看待，这一点在人类历史进程中却经历了漫长的时间。并且在近代物理学特别是狭义、广义相对论出现后，由于科学界过分重视数

学的推演而忽视对相应概念的深入分析，从而使得人们将时间与物质的变化过程两者之间以更复杂、更隐蔽的形式等同起来，如在热力学中将原本属于物质变化过程的方向性赋予时间从而认为时间也具有方向性；又如在相对论中将物质变化过程的路径的膨胀与时间的膨胀等同起来从而导出所谓的时间发生膨胀的错误结论；再如量子力学中将微观物质的变化过程所需时间具有不确定性这一不确定关系解读为时间本身具有不确定性甚至具有量子特性，这一系列在更高层次上将时间与物质变化过程等同起来的做法都对时间的本质问题理解造成了严重困难，因此，对物质的变化过程与时间之间的差异进行详细分析具有现实的意义。

时间与物质的变化过程之间的关系是如此得密不可分，以至于人们在不经意之间就会将两者等同起来，特别是在人类早期文明中对两者是不加区分的。在古希腊时期，正如亚里士多德在其《物理学》中所说："最流行的说法还是把时间当做一种运动和变化[①]。"如古希腊哲学家柏拉图提出的"时间是无所不包的天球的运动"[②]的观点。再如柏拉图在其作品《蒂迈欧篇》中将时间完全等同于运动的观点："……原本是永恒的，他也尽可能使宇宙永恒。存在本性永恒，要把这个属性完满的给予创造物是不可能的。因而，他决定造一个永恒的运动性摹本。他使天空井然有序，模仿那永居统一的永恒，制造了永恒的摹本，摹本要按照定数运动。这个摹本我们叫做时间。……即使是'过去'和'将来'，虽然我们在不知不觉中错误的将它们归诸于永恒的存在，其实也只是时间的变形而已。我们常说，它'现在是'、'过去是'、'将来是'，可真正说来，只有'现在是'才是最合适的术语。而'过去是'、'将来是'，只是对时间进程中的变动而言的。因它们都是运动。……它摹仿永恒，并根据一定的数目作圆形旋转[③]"；针对当时人们将时间等同于运动或变化的流行说法，亚里士多德通过对时间与运动之间的关系的详尽分析对其进行了驳斥，亚里士多德论证道："每一个事物的运动变化只存在于这变化着的事物自身，或存在于运动变化着的事物正巧所在的地方；但时间等同的出现于一切地方，和一切事物同在。其次，变化总是或快或慢，而时间没有快慢。因为快慢是用时间确定的：所谓快就是时间短而变化大，所谓慢就是时间长而变化小；而时间不能用时间确定，也不用运动变化中已达到的量或以达到的质来确定。因此可见时间不是运动[④]。……时间不是运动，而是使运动成为可以计数的东西[⑤]。"也就是说时间只能作为对物质的变化过程进行测量及描述的标准从而自身是不可能变化的。亚里士多德

① [古希腊]亚里士多德．物理学[M]．张竹明，译．北京：商务印书馆，1997：123.
② [古希腊]亚里士多德．物理学[M]．张竹明，译．北京：商务印书馆，1997：122.
③ 苗力田．古希腊哲学[M]．北京：中国人民大学出版社，1989：382.
④ [古希腊]亚里士多德．物理学[M]．张竹明，译．北京：商务印书馆，1997：123.
⑤ [古希腊]亚里士多德．物理学[M]．张竹明，译．北京：商务印书馆，1997：125.

还认为:"时间本身是不运动的。只有同运动联系在一起,才会出现时间。这是因为,只有在运动上才能读出时间的数。在亚里士多德看来,说时间自己是某种运动着的东西,是十分荒谬的。因为数是某种不运动的东西。正是在这个意义上,亚里士多德才在时间的定义中说:时间只存在于某种运动上,比如,存在于钟表指针的运动上[①]。"显然,亚里士多德通过对时间与物体的运动之间的分析、比较得到的时间是不同于物体的运动的结论同样适用于物质的变化过程,也就是说时间完全不是(或不同于)物质的变化过程。另外,亚里士多德的观点"时间是被数的数,不是用以计数的数"[②]本身就隐含时间是不同于变化过程的对象这一前提,用近代及现代物理学的语言即时间是被(时钟)测量的量而非用于测量的量,即时间是被测量的对象而非用于测量的工具,而时钟则是用于测量而非被测量的工具,因此在这个意义上说时间也是不同于时钟的对象(可见,爱因斯坦在相对论中直接将时钟与时间等同起来的做法是完全错误的)。除此之外,亚里士多德通过进一步的分析认为时间虽然不同于物体的运动,但与物体的运动之间存在密切的关系,特别是时间不能脱离运动和变化而存在。亚里士多德认为时间虽然不是运动,但却是使得运动成为可以计数的东西,确切地说时间是不同于物质的运动或变化过程并且不可能独立于物质的运动或变化过程而存在的对象,是运动的数。从形式上看,尽管亚里士多德对时间不同于物体的运动这一观点的论证基本上是严格的、有说服力的,但也有人认为这一推理过程并非无懈可击,而是存在一些需要继续完善的内容,如哲学家 R. L. 普瓦德万在其著作中所指出的:

"时间确实是快慢不一的,至少看起来是这样。恋爱中的人相距的几个小时肯定过得很快,而在乏味的劳动中感觉时间走得非常缓慢。这种现象不能简单说成是错觉。既然我们会对空间的东西产生错觉,比如一个物体的形状、大小,或者它离我们的距离,那么为什么时间就不会呢?为了明白假设时间本身以不同的速率经过的意义,想想我们是如何测量其他种类变化的速率的,比如一辆正在驶过的公共汽车的速度,我们测量它在一定时间里驶过的距离。或者考虑炉子上的水壶。它加热的速率是通过测量一定时间内升高的温度而得到的。所以,变化率是某个空间量在多个时间单位里的变化值。那么我们如何测量时间流逝的速率呢?哎呀,推测起来也应该是和时间相除。但是,这就得到时间的速率永远不会改变的结论。因为如果 5 分钟不是 5 分钟的话,那么 5 分钟又是多长呢?但是,亚里士多德的反驳也许忽略了这一点。的确,时间不可能等同于某些特定的变化,比如沙堆的城堡慢慢地崩塌。时间等同于变化当然指的是时间等同于一般的变化。但是,我

① [德]克劳斯·黑尔德.时间现象学的基本概念[M].靳希平,孙周兴,张灯,柯小刚,译.上海:上海译文出版社,2009:29.

② [古希腊]亚里士多德.物理学[M].张竹明,译.北京:商务印书馆,1997:124－125.

们根本不清楚能否观察到一般的变化(即宇宙所有变化的总和)正以变动的速率运动。假设世界上所有变化的速率都提高一倍,这种想法有意义吗?亚里士多德不会这样想。首先我们不可能观察到这样的速率上的变动,因为我们只是在把某个变化和其他变化比较时才能注意到这个变化的速率上的变动。比如,我们通过规则的时钟或我们自己的生物钟测量日出和日落之间的时间,才观察到冬天开始的时候白昼会变短。

时间不等同于某些特定的变化而是变化的总和。这似乎可以避免亚里士多德的第二个反对意见:变化局限于空间的某些部分,而时间是普遍的。只有单个的变化才在空间上是有限的,而变化的总和占据整个空间。

这也许消除了变化概念的一个模糊之处,但还有另外一点。我们认定时间是哪种变化呢?我们是认为时间等同于人们能够直接感知的所有日常变化之和,如一片叶子颜色的变化呢?还是等同于那些无法直接感知、但是隐藏在可感知的变化下面的变化之和,如分子的运动?或者还是应该思考时间自身的流逝,即事物无情地从现在运动到遥不可及的过去呢?当然,一位说时间可以定义为时间的流逝的哲学家不会得到什么更多的结果,因为这是用时间本身来定义时间。最自然地是把时间表述(虽然一些哲学家会反对这种表述的方式)为事件的变化,即事件慢慢从将来成为现在,然后越来越远变为过去[①]。"

由此可见,在 R. L. 普瓦德万看来时间并非不快不慢,而是可以变化的,并且时间与物质的运动或变化过程是等同的,但从我们第 1 章的分析结果看来这种观点是错误的,尽管我们对时间的感知会因心境或环境的不同而有所不同,或者尽管如相对论中所说时间会随参照系的不同而发生相对变化(即所谓的时间的相对膨胀),但这都是测量意义上的,时间本身并不会随之而发生变化。而将时间等同于一般性的变化过程的观点正如 R. L. 普瓦德万自己所作的分析指出的也是存在问题的。当然,虽然亚里士多德坚持认为时间不同于物体的运动或物质的变化过程,但却始终认为时间具有流动性(即不断地从过去流向现在再流向未来),这也就意味着时间仍然被认为是变化——一种本质上是非物质形式的变化,虽然这种变化不同于我们所观察到的任何具体的物质的变化。但在论证过程中亚里士多德并未指出两者之间有何不同之处,而且亚里士多德对于因为假定时间具有流动性而导致的悖论也没有进行深入的分析。

其实,除了亚里士多德在论证过程中所列举的时间与物质的变化过程之间存在的不同点之外,两者之间还存在以下不同:①原则上物质的变化过程能够被我们的知觉系统所直接感知到,而时间则无法被我们的知觉系统所直接感知,即使借助

---

① [英]R. L. 普瓦德万. 四维旅行[M]. 胡凯衡,邹若竹,译. 长沙:湖南科学技术出版社,2005:15—17.

计时装置(如时钟)也不能将时间转化为人类的知觉能够直接感知的内容。这一点在关于时间的可感知性中我们已进行过详细的讨论。②我们可以借助仪器对物质的变化过程进行直接的测量却永远无法实现对时间的直接测量。具体地说由于物质的变化过程具有时间性,因此我们只能通过对物质变化过程的测量实现对时间的间接测量。这一点在关于时间的可测量性中我们已进行过详细的讨论。如我们通常是使用钟表指针的旋转来测量时间,在测量时间过程中钟表指针的变化过程可以用角位移公式 $\theta=\omega t$ 描述,显然,钟表指针的角位移 θ 的数值(这里的 θ 的确切值就是我们通常认为钟表对时间的测量值,其单位是计时单位,例如10时05分30秒)与时间 t 本身是完全不同的,即钟表指针的指示的数值可以代表时间但并不唯一等同于时间,也即时钟的指针所指示的直接是旋转变化过程中所对应的具体的角度而并非直接就是时间本身。仅仅由于钟表指针的角位移 θ 与时间之间存在一一对应的关系,从而使得我们可以强制性地将二者等同起来,共同约定时钟的指针所指示的就是时间。其实即使是数字式时钟其不断变化的数字显示的也不直接就是时间,而是一个数值到另一个数值的跳变过程,由于这种变化过程具有时间性,并且从一个数值到紧接着的下一个数值的变化所需要的时间基本都是恒定的,因此我们可以将这种变化认为是时间,并且可以以此为标准来对任何一个物质的变化过程进行计时,而如果数字式时钟用于标记时间的显示数值是永远不变的,即没有可供识别的变化发生,那么我们就不可能将其作为时钟使用。③所有物质的变化过程都受因果关系、受物理规律(如能量守恒定律、动量守恒定律以及其他的各种规律)等支配,这些物理规律可以用数学语言进行描述;时间则完全不受因果关系以及任何物理规律的支配,无需用而且也不可能用任何数学公式进行描述;例如物质的运动过程可以用位移公式 $S=Vt$ 描述,显然时间 t 与运动过程 S 是完全不同的对象。④物质的变化过程具有方向性或者不可逆性,而时间则没有方向性、不可逆性。如热力学系统的变化过程遵循熵增原理,即所有孤立的热力学系统的熵总是随时间的增大而不断增加,而相反的过程则不可能发生;而根据前一个章节的讨论得到的结论,我们知道时间没有方向性。⑤物质变化过程具有复杂性及多样性,很多物质变化过程的复杂程度甚至完全超出人类的想象。比如物质变化过程的发生可快可慢,可以呈现出周期性或者随机性(如微观物质的变化过程),有些变化过程还会呈现出空间对称性甚至自组织特征,有些变化过程随着量变的积累还会呈现出质的变化等。而时间的表现形式则平凡、单调,用通俗、形象(但并不科学)的语言来说即时间总是在连续、均匀的流逝,连续性及均匀性是时间的最重要的表现形式。按美国科学家罗伯特·兰札等的观点:“时间是一种寻找功能的概念——当我们谈到变化(有加速度的时候除外)就如我们将会看到的那样,变化(通

常用希腊语大写字母Δ这个符号表示)是与时间不同的东西[①]。"而如果认为时间与物质的变化过程之间是完全等同的，就会得到悖论式的结论，这一点正如英国哲学家R. L. 普瓦德万在其著作中所说"运动着的物体，变化着的情感，正在发声的时钟，所有这些都是时间。或许我们自然而然就是这么想的。因此用时钟来计时的奇怪之处在于：它们和它们要测量的东西是一回事。于是我们又回到开头的问题一正确测量时间或者不正确测量时间是指什么呢？而这次更加困惑。特别是，如果说一台时钟正在测量的是它自己的变化，那又怎么可能出错呢？[②]"由此可见，时间必定是完全不同于物质的变化过程的对象，换句话说时间是比物质的变化过程更纯粹、更单调甚至更基本的对象，而由于一切物质的变化过程都具有时间性，从而所有物质的变化过程都必须借助时间参数 t、用时间的一元函数才能得到很好地描述。

在亚里士多德的论述过程中，虽然对时间与物质的变化过程是完全不同的对象这一观点的论证是严格的，但在对时间与物质的变化过程之间存在的关系进行论证特别是对时间不能脱离变化而存在的论证过程中显然缺乏逻辑的严密性，而实际上这种严格意义上的逻辑推理并不存在的，正因为如此，亚里士多德之后的一些思想家会提出与之完全不同的思想观念。其中一部分人认为时间是完全独立于(不同于)物质的变化过程的实体性存在(即所谓的绝对时间)，持这种观念的最重要的代表人物就是伟大的科学家伊萨克·牛顿。牛顿的著名表述——绝对的、真实的、数学的时间，这种时间由其本身的特性所决定，它均匀地流逝着，与外在的所有事物没有任何关系——所揭示的时间的特性至今仍然影响着人们对时间的本质的思考，以至于今天科学界仍然有人坚持这一观念。而唯心主义哲学家们则坚持认为时间仅仅是存在于人们意识中的主观形式，持这一观念的唯心主义哲学家的重要代表有圣·奥古斯丁、康德等。奥古斯丁认为时间是上帝创造出来的，因此上帝必定不在时间之流中，而如果假定时间具有客观性，那么上帝必定处于时间之流中，这显然与时间是上帝的造物相矛盾。正如吴国盛教授在其著作中所叙述的，为了解决这一矛盾，奥古斯丁："有意引进一种绝对时间，它超然于任何物体包括天球的运动，它不是物体的运动，但却成为一切运动的参照系。但是这个绝对时间如何度量又成了问题。经过反复的辨析，奥古斯丁终于认识到，这个绝对的时间就是存在于心灵的时间。'我的心灵啊，我是在你里面度量时间……事物经过时，在你里面留下印象，事物过去而印象留着，我是度量现在的印象而不是度量促起印象而已经过去的实质；我度量时间的时候，是在度量印象'。

---

① [美]罗伯特·兰札，鲍勃·伯曼. 生物中心主义[M]. 朱子文，译. 重庆：重庆出版社，2012：78.

② [英]R. L. 普瓦德万. 四维旅行[M]. 胡凯衡，邹若竹，译. 长沙：湖南科学技术出版社，2005：5.

过去尽管已经过去，但记忆犹在，未来尽管尚未到来，但期望已在，现在尽管疾驰而去，但注意能持续下去。期望通过注意注入记忆，这就是真正的时间，它只存在于人心之中。正是它使得一切运动包括天球的运动得以度量。

时间之流的内在化，使奥古斯丁能够回答上帝不在时间之流中所导致的困难。如果根本就不存在什么外在的时间之流，当然就不会对上帝的全知、全能和永恒构成威胁，上帝也不会因不处在时间之流中而对时间之流中的事物没有办法感知和控制。时间之流纯然是人心中的存在，时间对上帝而言根本不存在。'我们自己唱，或听别人唱一支熟悉的歌曲，一面等待着声音的来，一面记住了声音的去，情绪跟着变化，感觉也随之迁转。对于不变的永恒，对于真正永恒的精神创造者，绝无此种情形。一如你在元始洞悉天地，但你的知识一无增减，同样你在元始创造天地，而你的行动一无变更。'通过将时间之流内在化，上帝终于摆脱了时间的束缚[①]。"而康德关于时间的本质特征的论述与之完全类似："时间不过是我们内部直观的形式。如果我们抽掉我们感性的特有条件，时间的概念也就消逝了；因为时间并不属于对象，而只属于直观到对象的主体[②]。"以上具有代表性的观点虽然极端，即都是将时间看做完全独立于物质的变化过程并且与物质及其变化过程没有任何关系的对象，但前提显然都是将时间看做完全不同于物质的运动或变化过程的对象，只是前者将时间看做独立于一切物质及其变化过程之外的存在，而后者则将时间看做仅仅存在于人心之中的对象。

自亚里士多德揭示了时间与物质的变化过程是不同的对象之后，很少再有人会将时间与物质的变化过程直接等同起来。但由于对科学理论认识、理解的局限性，人们（甚至包括许多著名的科学家）仍然会在不经意间将原本属于物质的变化过程的性质不加思索地直接套用到时间上，而这就产生了诸多关于时间的悖论。比如，方向性原本属于物质的变化过程，但由于人们对物理方程的时间反演变换操作理解上的错误而将热力学系统的变化过程对时间反演变换的对称性破缺归结为时间具有方向性，而实际上热力学系统的变化过程对时间反演变换的对称性破缺仅仅反映了热力学系统的变化过程的方向性，并没有对时间的方向性提供任何证据；又比如所谓的流动性其实是物质的变化过程的属性，由于物质的变化过程在不断地进行，使物质的变化过程总是表现为不断地从未来（还未发生）到现在（正在发生）再到过去（已经发生过），而人们却认为这是由于时间在不断地从过去向现在再向未来流逝造成的，并且认为由于时间是独立于物质的变化过程并且不受物质的变化过程而不断流逝的，而一切物质的变化过程都发生在不断流逝的时间长河中，

---

① 吴国盛．时间的观念[M]．北京：中国社会科学出版社，1996：101．

② [加拿大]约翰·华特生．康德哲学原著选读[M]．韦卓民，译．北京：商务印书馆，1987：35．

使得人们将原本属于物质的变化过程的流逝性强加到时间上，导致人们错误地认为流动性是属于时间的性质；再比如物质完成其变化过程需要的时间具有相对性这一性质原本属于物质的变化过程的，但在狭义及广义相对论中，爱因斯坦将时间与时钟（显示或指示的数值或角度）等同起来，特别是有的科学家（如英国物理学家保罗·戴维斯）甚至认为："测量爱因斯坦宇宙中的物理变化的唯一有意义的方法是忘却时间'本身'，同时仅仅依靠真实的物理时钟的读数测量变化过程，而不是依靠某种不存在的'时间本身'观念[①]。"正是基于对相对论部分结论的错误理解而导致对时间概念的完全否定，人们将原本属于物质的变化过程的性质强加到时间上或者将两者完全等同起来并因此得到时间具有相对性的错误结论；又比如在微观现象中物质完成其变化过程所需要的时间具有不确定性，其不确定性程度由海森堡不确定关系所决定，这一性质原本属于物质的变化过程，而有的科学家则将其强加给时间本身，从而错误地认为时间具有量子性并进而否定时间的连续性，从而导致了对时间的错误理解。由此可见，正是由于时间概念在物理学理论中完全以抽象符号（即 t）的形式存在，而物理学家在相当程度上又将物理学理论看做纯粹的准符号体系，并且在这样的体系中只要遵循数学运算法则，在运算过程中使物理方程中每一个符号之间确定的数学关系保持不变或进行等效变换，那么任何一个符号即使被赋予完全不同的意义也可以丝毫不影响整个体系的数学推理过程（这种情况正如德国著名数学家希尔伯特在建立抽象的几何体系时所说的，可以将几何体系中的"点"、"直线"等概念用"酒瓶"、"椅子"等具体事物代替而丝毫不会影响到整个几何体系的抽象的数学推理过程），正是在这种状况下几乎每一个物理学家都在按自己的理解赋予时间参数 t 以不同的意义及内容，而且把许多原本应该属于物质变化过程的性质强加于时间，从而造成了对时间概念理解上的混乱，而在如此混乱的时间观念中是肯定无法产生出正确的时间概念的。

正因为时间是与物质的变化过程不同的对象，狭义及广义相对论中所描述的由于相对运动或者空间弯曲导致的物质完成其变化过程所需要的时间增加从而物质的变化过程变慢（时钟变慢是物质的变化过程变慢的一个特例）与时间变慢也是完全不同的现象，也就是说从物质的变化过程变慢现象无法必然的推论出时间变慢现象，从而物质的变化过程变慢（如时钟变慢）不等于时间变慢；另外我们知道在黑洞中所有物质完成其变化过程需要的时间都是无穷大，也就是说在黑洞中所有物质的变化过程都停止了，但物质的变化过程的停止与所谓的时间的停止同样是完全不同的现象，两者是不能等同的。这与我们在第 1 章中得到的结论完全一致，即在高速运动的参照系中时钟的计时频率会变慢但时间并不会因此变慢；而当参

① ［英］保罗·戴维斯．关于时间——爱因斯坦未完成的革命［M］．崔存明，译．长春：吉林人民出版社，2002：242．

照系的运动速度接近光速时相对于静止的参照系而言，动系中的所有时钟的频率都趋近于零，即在静系中的观察者看来动系中所有的时钟都接近停止摆动从而几乎无法继续作为计量时间的工具，从而动系中基本不再存在任何可以作为计时工具的物质的变化过程，但由于在静系中的观察者看来，动系中的所有物质仍然存在，因此时间并不会停止。所有这一切都表明，物质的变化过程是完全不同于时间的对象，即物质的变化过程不同于时间但需要时间，从而在谈论两者时必须将两者做严格区分，否则就会导致完全错误的观点。

3.2 时间隐含在(或内在于)一切物质的存在及变化过程中

由于时间不能被我们的感官所直接感知，即时间并非我们所能直接把握的对象，而且我们借助时钟等计时工具所测量的对象也不是确定无疑的，从而我们不可能使他人完全接受我们当下借助时钟正在进行测量的就是时间本身的看法。通过前面对时间的可感知性的讨论，我们知道，由于时间是一种具有普遍意义的对象，从而不可能感性地存在，因此我们不可能像感知物质及其变化过程那样直接对时间进行感知，从而时间的可感知性只能是间接的而非直接的可感知性。实际上，我们通常所说的对时间的感知是通过对具体的物质变化过程的感知实现的，如英国物理学家保罗·戴维斯在其著作中引述罗马哲学家、诗人卢克莱修关于人是如何感知时间的诗句："时间也不能单独存在，在万物的飞逝中，我们才能感受到时间……我们必须坦承，没有人能把握时间本身，只能从万物的飞逝或他物中获悉时间[①]。"又如英国哲学家R.L.普瓦德万在其著作中对时间作如下详细描述："想想我们是如何感受时间的：朝窗外看时，我看见一个马栗果在微风中晃动，看见一只鸟落到树枝上休息片刻然后又飞走了；我听到路上一辆汽车开过时的轰鸣声；远处传来的教堂的钟声告诉我现在是三点钟。闭上眼睛，捂住耳朵，我还是能够感觉到我驰骋的思想。所有这些都提醒我时间在流逝。换句话说，我通过感觉变化来感觉时间。所以也许时间和变化就是一回事。运动着的物体，变化着的情感，正在发生的时钟，所有这些都是时间[②]。"当然，普瓦德万教授在此由"我通过感觉变化来感觉时间"直接推论出"时间和变化就是一回事"，从而将时间与变化相等同的观点我们是不认同的。我们还可以举出许多关于我们是如何感知时间的类似描述，但无论如何所有这些描述都将向我们表明，时间是无法被我们的感知系统所直接感知的。而正是由于一切物质的变化过程都具有时间性，才使得当物质的变化过程

① [英]保罗·戴维斯.关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M].崔存明，译.长春：吉林人民出版社，2002：5.

② [英]R.L.普瓦德万.四维旅行[M].胡凯衡，邹若竹，译.长沙：湖南科学技术出版社，2005：4—5.

从一个状态过渡到另一个状态时，这一变化过程所需要的时间才能够凸显出来，这一变化过程所具有的时间性才能够被我们所间接认识。按现象学的说法，我们是而且只能在等待或期待中，在烦与忙中感知、体验到时间并最终认识到“时间就是时间性的显现或到时，认识到时间性总要到时、总要展现为时间”。这就意味着时间不是以物质的形式存在或者直接附着在物质的结构中，按现象学的说法，由于“时间性不是存在者，时间性不存在，时间性只到时”，而时间就是时间性的展现，因此时间无法被我们的知觉系统直接感知到，通俗的说时间看不见、摸不着，从而我们无法随意从中取出一段来放在他人面前并指着这一段时间明白无误地告诉他人：“瞧，这就是时间”，并且随时对其进行随意的观察。

实际上，我们不仅无法直接感知时间，而且对时间的直接测量也是不可能实现的，而是必须借助物质的变化过程间接实现对时间的测量，如哲学家叔本华在其对空间与时间的各种性质的总结中就有过类似的结论：“时间不能通过自身而被直接测量，只能通过在时间和空间中的运动间接地测量：比如，太阳和钟表的运动测量时间[①]。”而正是由于时间的这一特性导致了我们自以为确实是在用时钟对时间进行测量的情况下，旁观者(甚至包括我们自己在内)经过深入思考后仍然会怀疑我们所测量的到底为何物的问题，甚至有学者因此而否定时间的客观性。对此，历史上包括科学家在内的许多学者都有过精彩的论述。如伟大的神学家圣·奥古斯丁在《忏悔录》中思考关于时间的本质的问题时，对关于时间测量的意义提出了质疑。以下圣·奥古斯丁的相关论述转引自英国哲学家 R. L. 普瓦德万的著作，同时也是圣·奥古斯丁借以否定时间的客观性的理由：

“他思考的一个问题是，我们是否在测量以及如何测量时间的流逝：

当我说我能测量时间的时候，我的灵魂对你说的是事实吗？我确实在测量它，但我不知道测的是什么东西。我用时间来测量物体的运动。这不就意味着我在测量时间本身吗？物体在时间里运动，如果我测量的不是这个时间的话，我还能测量一个物体的运动，即测量它的运动持续了多长时间或者物体在这两点间运动化了多少时间吗？

不管怎么说，还有一个困难：如果它不是存在，或者不再存在，或者它没有长度，或者没有开端和结尾，我们就无法测量它。所以，我们测量的既不是将来、过去和现在，也不是正在流逝的时间。可是，我们又确实在测量时间。用稍微有点不同的话来说：我们在测量时间的时候显然是在测量某种存在的、有长度的东西。但是，过去和将来都不存在，‘现在’也没有长度。而时间剔除了过去、现在和将来之后就什么都不是。那么，我们正在测量什么呢？(奥古斯丁自己的观点是时间全是

① 吴国盛. 时间的观念[M]. 北京：中国社会科学出版社，1996：165.

意识的东西。这就解决了问题吗?)①。"

又如R.L.普瓦德万在其著作对人们使用时钟进行测量到最终怀疑所测量的对象究竟为何物所做的细致入微的描述如下:

"我们想当然地认为时钟就是用来测量时间的。但是如果我们再仔细想一想,这种习以为常的观念也许有些特别的地方。对一台仪器来说,测量时间指什么呢?鲍乌斯玛(O. K. Bouwsma)写的一个故事《时间的神秘》(或《不明白的人》)准确把握了测量时间想法的奇特之处。故事的主角被时钟搞糊涂了。人家告诉他在测量时间,但是,虽然他瞧见这些人正在做所谓的测量的活,却仍然不明白他们测量的是什么。对其他种类的测量仪器来说,测量什么是很清楚的。例如一条皮尺丈量的是布料的长度,一对天平称的是面粉的质量,一只量瓶测量的是水的体积,等等。这些例子中测量的东西是清清楚楚看得见的,可时钟记录的似乎是不能为我们所感觉的东西。也许世界上真的有某种看不见的永恒的流体流过这些时钟,使得指针绕着刻度盘转?也许根本没有什么时间,只是机械自己在没有外力的作用下运转?我们的主人公开始怀疑测量时间只不过是一种骗人的玩意。实际上这个故事与《皇帝的新装》正好倒过来:本来没有什么骗人的把戏,时钟的确在度量某种看不见的东西。

最初我们会笑话这个人傻得可爱。他在唯物主义者的观点上走得如此之远,想当然地以为任何可测量的东西就一定能看得见。但问题还没那么简单,时钟通过它自己是一个时序过程来记录时间的流逝。我们自己也在成长的过程中记录时间的流逝,季节的循环也只不过是表明滚滚向前的时间之流的另一种变化。所以时钟就像我们一样通过自己的变化记录下变化,只不过时钟是一种特殊规则的变化。现在我们开始明白,用时钟测量这种想法的古怪之处在于:与厨房里的秤不同,它们要测量的东西不是完全无关的。因为当人们谈论时间的时候,他们不正是在用一种抽象的方式谈论变化吗②?"

美国科学家罗伯特·兰札等在其著作中对人类广泛使用周期性现象对时间进行测量到底意味着什么的问题也有类似的观点:"时钟是有节奏的东西,意思就是说,时钟具有不断重复的过程。人类利用某些事件的节奏,如时钟的计数来测定其他事件的时间,比如地球的转动。但这并不是'时间'而是事件之间的比较。特别是经过许多时期以后,人类观察到了自然中有节奏的事物,比如,月亮或太阳的周期性、尼罗河的洪水。于是我们就创造出其他有节奏的东西来看它们是怎样关联的,从而达到比较单纯的目的。运动越规则,越重复,对我们的测量目的就越好

① [英]R.L.普瓦德万.四维旅行[M].胡凯衡,邹若竹,译.长沙:湖南科学技术出版社,2005:272—273.

② [英]R.L.普瓦德万.四维旅行[M].胡凯衡,邹若竹,译.长沙:湖南科学技术出版社,2005:3—4.

……在如此种种情况下，人类运用特定事件的节奏来计算出其他特定事件。但这些都不过是事件，不要与‘时间’混淆[①]。”

再如著名意大利物理学家卡尔罗·罗威利在其著作中通过对意大利物理学家伽利略发现吊灯在风的作用下周期性摆动的现象中所隐含的时间测量的意义进行详细的论述如下：“传说伽利略是在比萨的大教堂里产生了这个直觉，当时他观察到一盏缓慢摆动的蜡烛吊灯，这个烛台灯现在仍在那儿(这是假的，因为在伽利略的发现过去许多年之后，那里才悬挂了烛台的，但这是个美妙的故事)。伽利略在一次做礼拜时看到吊灯在摆动，但他不会太注意，他在数自己的心跳，这让他兴奋地发现，钟摆每一次摆动过程中，他的心脏跳动一次。所以他得出结论，每次摆动时间都是一样长。现在看这个故事很有趣，不过仔细想想就会感到困惑，这困惑仍是时间的问题。因为伽利略怎么知道他的每次心跳都是一样长短？几年之后，医生们开始用钟表来测量病人的脉搏，使用的仍然是钟摆式时钟。用脉搏来确定钟摆的摆动是否规则，又用座钟确定脉搏跳动是否规则。这不是一个怪圈吗？而这又意味着什么？这意味着，我们从未测量到时间本身。我们测量的只是诸如A、B、C等变量(摆动、心跳以及别的数据)，我们也是用一个变量去与另一个变量进行比较。所以我们测量的只是函数A(B)、B(C)、C(A)等。不过还是有必要认为变量t即‘真正的时间’是存在的，尽管我们不能测量到它，但它却隐藏在全部事物背后。我们为物理变量作出的所有公式都是基于这个视而不见的变量t。这些公式告诉我们，事物是怎样因时间t而变化(钟摆摆动以及每次心跳的时间长短)。从中我们可以算出这些变量相互发生的变化(如钟摆摆动一次，心跳几次)，然后我们再用这些预测与观察结果进行对比。如果预测是正确的，那么我们就会认为这个复杂的模式是完善的，也很管用，尤其是它用了变量t，尽管我们从未直接测量到它。换言之，时间变量的存在，与其说是观测结果，更不如说是一种假设[②]。”

所有这些论述都毫无疑问地证明，我们通常所进行的任何所谓对时间的测量都不可能是直接的，而且对时间的直接测量永远也不可能实施。也就是说，就使用时钟对时间进行测量这件事而言，我们所测量的对象归根结底是与时钟指针的角位移或指针顶端的线位移或钟摆摆动的次数完全不同的，看不见、摸不着，甚至被一些科学家、哲学家认为是根本不存在的对象，我们用钟表进行测量时所测得的以及钟表向我们直接呈现的实际上是其指针周期性的位移或变化而不是时间。

因此，严格意义上讲，我们使用钟表测量时并不是在对时间进行直接测量而仅仅是在用钟表呈现其指针的位移，因为并没有直接呈现在我们面前的时间可以供

---

① [美]罗伯特·兰札，鲍勃·伯曼.生物中心主义[M].朱子文，译.重庆：重庆出版社，2012：86—87.

② [意]卡尔罗·罗威利.假如时间不存在？——讲点颠覆常理的科学[M].李润，译.北京：化学工业出版社，2013：92—94.

我们测量。从而所谓对时间的测量其实就是用周期性变化过程对物质变化过程的时间性(即时间间隔)进行分割及赋值的过程,也就是说时钟指针指示的并非直接就是时间本身,即时间本身具有不可直接测量的性质。不仅如此,实际上就连我们通常用时钟所进行的测量得到的测量值同样也不直接就是时间。由于一切物质的变化过程都不是瞬间完成的,都具有时间性,而时间性是时间本身最重要的内容、是时间的本质特性,因此,我们用时钟测量的对象——时间——虽然看不见、摸不着,但必须认为是具有客观性的。

我们知道,指针必须处于不断旋转的状态的时钟中才能够被用于对时间进行测量,而时钟的指针在不断旋转过程中向我们直接呈现的仅仅是其角度的持续性变化——即角位移(或者指针的一个个确定的空间位置)。正如我们在前面讨论过的,在时钟的指针发生角位移时,指针所指示的对象的意义并不是唯一确定的,如时钟指针所指示的对象既可以解读为绕轴心旋转的角位移 θ(从而常用的计时单位为秒、分、时等时间测量单位),也可以解读为对时钟指针的角位移进行度量的角度单位而不仅仅只是时间的测量单位,这时借助时钟指针的角位移 θ(或指针尖端的线位移)与时间 t 之间存在的函数关系 $\theta = \omega t$,将其与时间 t 对应起来;也可以解读为指针的顶端沿圆周所走过的路程 S(从而计时单位秒、分、时还可以通过转换成为是对时钟指针的顶尖的圆周运动的弧长进行度量的长度单位),还可以解读为时钟的钟摆摆动的次数 n(从而计时单位秒、分、时还可以解读为一种周期性的单位——频次);而如果时钟是光钟,那么时钟的读数还可以解读为光子走过的路程,或者解读为光子完成在一个狭小空间中的周期性往返运动的频次;总之,时钟指针指示的直接对象就是运动或变化的量(这种量与时钟的各种结构单元的运动或变化存在对应关系)而非时间本身,这也就意味着即使我们使用钟表也只能实现对时间的间接测量,也就是说时间只存在于钟表指针或钟摆的摆动过程中而不是存在于钟表的任何结构中,实际上即使我们将时钟解体也无法在时钟的任何结构单元中观察到时间的影子,因为时间并不存在于任何事物中。

英国科学家保罗·戴维斯在其著作中谈到:“谈到时间这一话题,我们有着双重麻烦,因为事实上我们从未测量过时间本身(在任何客观意义上说)。我们没有把一段时间与某个独立的实在—‘时间’进行比较来测量这段时间,而这个独立的实在—‘时间’带着它内在的用来计时的‘刻度’悄然出现在所有运动的上空。如果你想测量时间,你就必须指定某种能进行测量的时钟,然后对这个钟进行观测。但是,时钟是不断变化的物体,而我们是通过观测某个钟的变量,诸如指针的空间位置来测量时间。当我们说‘地球 24 小时自转一周,实际上是说当地球相对于太阳处于某个方向时,时针指向 12 点钟,那么,当地球再次处于那个方向时,时针会再

一次指向12点'(当然,地球已经旋转了两周)[①]。"但由于时钟指针的旋转导致的指针角度或空间位置的变化过程具有时间性,从而用于测量时间的时钟的指针在不断发生的周期性运动过程中其角度发生的偏转与一个时间间隔相对应,即时钟的指针发生偏转的同时(或者我们对时钟指针的角位移测量的同时),对所经历(或需要)的时间也进行了间接的测量。因此,时钟指针所指示的角度或空间位置的变化可以间接地用于指示时间,而根据描述时钟的指针角位移公式可知,时钟指针的角位移与时间之间存在一一对应的关系,因此,人们使用时钟对时间进行的测量实际上就是将时钟指针所指示的角度值与时间直接等同起来,即认为时钟指针所指示的角度值直接就等同于时间本身,这显然是强制性的约定,当然,这种约定不是随意的,而是依据任何物质的变化过程都具有时间性的观念,且依据物质的变化过程与时间之间存在的对应关系。而当我们使用时钟指针的周期性变化过程对物体的空间位置的变化过程进行比较及测量时,能够获得物体的空间位置的变化过程所具有的时钟指针指示的周期个数。显然,时钟指针直接向我们呈现的是其角度或针尖线位移变化的量值而非时间本身,但由于时钟指针的角度或针尖位置的变化具有时间性,因此这种变化发生的同时又实现着对时间的间接测量。

除了钟表这种机械式计时装置外,所有其他(包括新近出现的原子钟、分子钟等)计时装置本质上都是借助物质的周期性或均匀性的变化过程实现对时间的测量的,从而所有的时钟都在间接地实现着对时间的测量,这也就意味着相对论中直接将时钟相对变慢现象直接等同于时间的相对变慢现象是不正确的。而这显然与因为空间的相对膨胀是直接导致时钟的测量值(如时钟指针的角位移或指针顶端的线位移或者钟摆摆动的次数)的相对膨胀的原因这一结论完全一致。由此可见,是时间的测量值而非时间本身具有相对性。

可见,正是由于一切物质的变化过程具有时间性,并且时间是物质变化过程的性质而不是物质的性质或物质性的存在,才使得我们无法对时间(即时间本身)进行直接的感知及测量。由于时间本身不能被直接感知及测量,它只能按其本来的样子显现出来,这显然与海德格尔在其著作中所说的"本己时间"(是现象学研究的对象及基础)具有相同的本体论意义,按字面意义理解,本己时间就是时间本身之意,因此,我们认为物理学中的时间本身这一概念与现象学中所说的"本己时间"这一概念相对应。

对于本己时间,德国哲学家克劳斯·黑尔德认为它实际上是胡塞尔和海德格尔的时间理论的共同基础,克劳斯·黑尔德在其著作中是这样叙述的:"有一种原初被经验的时间,它与我们日常生活中经验的、在哲学之外人们早已熟知的时间不

① [英]保罗·戴维斯.关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M].崔存明,译.长春:吉林人民出版社,2002:225.

相同，甚至对立。海德格尔在《时间与存在》一文中将其称为‘本己时间’，其意思是，按其原初的占有中是如何显现的样子来理解时间。海德格尔这里用 eigenlich（本己）这个词，是要强调，让事物本身，按其本来的样子显示出来，它是如何在原初形态上是 eigen 的，是它自己的，而这个事物恰恰是构成了西方现象学讨论之本质性领域的东西①。”

与“本己时间”意义相反的是“非本己时间”，海德格尔将其定义为自然科学中使用时钟进行测量所获得的时间的测量值，这是对“本己时间”进行测量获得的测量值。关于非本己时间的定义，德国哲学家克劳斯·黑尔德在其著作中是这样叙述的：“无论是在《存在与时间》中，还是在《时间与存在》中，‘非本己的时间’都在于，时间在我们面前显示为一个‘当下’的序列、一个现在的序列。这个‘现在’是可以在任意事件的阶段的计数中数出来的东西，用亚里士多德的表述，就是可以从运动上数出的东西……这种时间观被海德格尔在《存在与时间》中称之为‘对时间的流俗理解’②。”对此，黄裕生教授在其著作中进行了更为详细的说明：“作为纯粹测量的时间，意味着时间的关联结构被抽掉和抹平(nivellieren)。因此，时间不再是是其时或非其时的时间，不再是适合于做……或不适于做……的时间，而只是时间本身，是测量活动中的‘所计之数’。这种纯粹的时间，抽掉了一切关联结构的时间，只能是一种线性的时间流……从任何运动事物那里领会到的时间，本质上都是测量意义上的时间，而不管借什么运动事物进行测量，是以自在的天象运动，还是以人工钟表的指针转动，其所道出的都是现在：现在太阳升起，现在日落西山，现在八点一刻……所列计的都是现在。这样，物理学时间（纯粹测量时间）便显出了另一个基本特征：它是一种现在的时间(Jetzt-zeit)③。”

当然，海德格尔所提出的“本己时间”与“非本己时间”，这两个概念从本质上而言并不意味着存在两种时间，实际上，“本己时间”是“非本己时间”的前提条件，由于不受测量及事物的影响，因此具有绝对性；而“非本己时间”是对“本己时间”间接测量的结果，是量化了的“本己时间”以及“本己时间”的副本，因此“非本己时间”具有相对性。同时，“非本己时间”依赖于“本己时间”，并且必须从“本己时间”那里才能得到解释与理解。显然，从现象学的视角看来，本己时间（即时间本身）才是具有本体论意义的对象，而非本己时间（即测量所获得的时间）则是从属的、派生的概念，这也是为什么现象学在论述关于时间的问题时，要将关注的重点放在本己时间

① [德]克劳斯·黑尔德.时间现象学的基本概念[M].靳希平，孙周兴，张灯，柯小刚，译.上海：上海译文出版社，2009:48.

② [德]克劳斯·黑尔德.时间现象学的基本概念[M].靳希平，孙周兴，张灯，柯小刚，译.上海：上海译文出版社，2009:48.

③ 黄裕生.时间与永恒[M].南京：江苏人民出版社，2012:19.

而不是非本己时间的缘故。因此，在狭义及广义相对论中因为理论结构的需要而将借助时钟所测得的量化时间等同于时间，而在获得时间的测量值以后却又将时间本身(即本己时间)这一测量对象当做虚假的对象加以抛弃，从而否定其具有客观性，其结果显然又会导致对时间测量值的否定，最终必然导致对时间这一对象的彻底否定，这种做法是完全错误的。

以上讨论表明，我们使用任何计时工具都无法实现对时间的直接测量，任何所谓对时间的测量都只能是间接的，显然，时间的这一特征必定会在我们描述物质变化过程的物理方程的表达形式中反映出来。我们知道，通常情况下物理学方程都是用显含时间参数 t 的形式表达的，这是自伽利略引进时间参数 t 从而创立运动学以后，包括经典力学、经典热力学、经典电磁学乃至相对论及量子力学在内的几乎所有物理学的常规表达形式。正如意大利物理学家卡尔罗·罗威利在其著作中所提到的："时间存在于所有或几乎所有经典物理学的方程式中，它就是符号 t 所代表的变量。那些方程式告诉我们，时间如何在时间过程中发生变化，让我们得以预测在某一未来时间所能发生的事情，假如我们知道曾经发生过的事情。更准确地讲，我们可以测量一些变量，比如某一物体的位置 A，一个钟摆的振幅 B，体温温度 C 等，于是方程式就可以告诉我们，这些变量 A、B、C 是如何在时间过程中发生变化的。也即是说，这些变量说明了在时间(t)过程中所发生变化的函数 $A(t)$、$B(t)$、$C(t)$等[①]。"

我们所能直接观察到的都只是各种各样的具体的物质变化过程，而时间并不能被我们的感知系统所直接感知，并且一般情况下用于测量时间的时钟向我们直接呈现的，也同样是不断发生着的物质的变化过程(如时钟指示的数值应该直接是其指针的角位移或指针针尖的线位移或钟摆摆动的次数)而非直接就是时间本身，这就意味着物理学中一直在使用着只能被间接观察及测量到的最重要参数——时间——对一切物质的变化过程及其规律进行描述。

由于时间本身并非直接而是间接地在物质的存在及变化过程中呈现出来的，因而我们直接用时间参数 t 建立物理方程来描述物质的变化过程并没有真正体现出时间这种间接性的特征。那么，我们能否不使用时间参数而仅仅借助(具有周期性或均匀性特征的)物质变化过程为标准(从而将时间 t 作为一个隐参数)来描述物质的变化过程从而建立物理方程呢？通过下面的讨论我们将看到，这一点是毫无疑问的，也就是说对于建立物理方程而言，物质的存在及其变化过程是自足的。

我们知道，在各种物理教材中对物体的位移都是用时间 t 作为自变量进行描

① [意]卡尔罗·罗威利. 假如时间不存在——讲点颠覆常理的科学[M]. 李润，译. 北京：化学工业出版社，2013：90—91.

述的，物体的位移量 S 是时间 t 的函数（不仅如此，实际上除时间 t 之外的所有描述物质的变化过程的物理量都被表达为时间 t 的函数），从而有：

$$S = S(t) = \int_{t_0}^{t_1} \mathrm{d}S = \int_{t_0}^{t_1} \frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t$$

其中，时间参数 t 是借助时钟所测得的值。

从上述位移公式我们可以清楚地认识到，任何物体空间位置的变化都具有时间性，即任何物体完成其空间位置的变化都不可能是瞬间的，而都是需要一定的时间才能完成的；对位移公式中的时间 t 而言，我们对其进行测量的方法是使用时钟的指针在钟面上的不断地旋转，以这样一个均匀的、周期性的变化过程的每一个周期为单位，对时间 t 进行分割，从而实现对时间 t 的测量及数量化。

通过前面的讨论我们知道，时钟钟面上的指针位置可以有不同的解读，即其意义并不是唯一的（不一定必须解读为时间），比如除了通常将其解读为时间之外，还可以解读为时钟指针以 0°为起点绕圆点持续进行着的偏转角。我们知道，时钟指针的角位移公式为 $\theta=\omega t$（钟表指针的旋转运动还可以用指针顶端的线速度描述），角位移 θ 的度量单位可以是弧度，也可以是“度”、“分”、“秒”等单位。如果在时钟的角位移公式中，令 $\omega=1$，即时钟指针偏转的速度是每秒钟 1″角度（这也是标准时钟的指针偏转的速度），则有 $\theta=t$。如果我们将标准时钟的指针位置的对应值解读为指针的偏转角，那么我们只需要直接沿用现有的时钟的读数（最多只需将原先时间计量单位中的“小时”用现在的角度计量单位的“度”代替即可，原先时间计量单位中的“分”与“秒”，其实可以直接认为是角度的计量单位，从而物理学中关于时间的基本计量单位就可成为角度的计量单位，原先的时间量纲则变为现在的角度量纲），同时，将物理学中的所有与“时间”有关的名词改为“角度”，再将所有物理方程中的 t 用 θ 代替，就可以将所有显含时间 t 的物理学方程转换为显含“角度”θ（而不显含时间 t）的形式。实际上，即使 $\omega\neq 1$，经简单的数学变换，我们仍然可以得到类似的结果。例如，对上面的位移公式，经过相应的数学变换我们就可以将其表达为不显含时间 t 的函数：

$$S = \int_{t_0}^{t_1} \frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t \xlongequal[t_0 \to \theta_0,\, t_1 \to \theta_1]{t \to \theta = \omega t} \int_{\theta_0}^{\theta_1} \frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}\theta}\mathrm{d}\theta$$

特别的，则对于匀速直线运动的物体，其位移公式：

$$S = \frac{S}{t} \cdot t = \frac{S}{\omega t} \cdot \omega t = \frac{S}{\theta} \cdot \theta = V\theta$$

其中 $V=\dfrac{S}{\theta}$ 是物体运动的速度，在这两个公式中都不显含时间参数 t，即位移 S 是自变量 θ（角度）的函数，自变量 θ 的意义是时钟指针的偏转角持续不断旋转的位置被解读为指针的角位移。用类似的方法可以将所有物理量都表达为 θ 的函数。经

过上面的步骤以后，再将得到的物理量带入现有的物理方程中就可以得到显含时钟指针偏转角 θ(不显含时间 t)的物理方程。显然，这一方法具有普遍意义，这也就意味着我们可以将这一方法用于任何描述物质的变化过程的、显含时间的物理方程，从而可以将这些物理方程变换为不显含时间参数 t 的物理方程，也就是说时间 t 可以成为任何描述物质变化过程的物理方程的隐参数，同时由于我们无法对时间进行直接感知及测量，因此，时间 t 隐含在(内在于)一切物体的空间位置变化过程中，更一般地说是隐含在物质的变化过程中而非独立于物质的变化过程之外。因此我们也可以说正是由于时间隐含在物质的变化过程中，所以时间不能被我们直接感知及测量，但我们可以认为在使用时钟进行实际的测量时，不仅仅是在对运动或变化过程本身进行直接测量，而且也是在间接地测量着隐含在物质的运动或变化过程内部的时间。而正是由于一切物质的变化过程都具有时间性，从而时间已经隐含在一切物质的变化过程中，因此对于描述所有物质的变化过程而言，时间 t 并非一个必需的参数。

需要特别指出的是，如果我们将两个结构完全相同的时钟的初始偏转角调整到完全相同后，分别放置在两个发生相对运动的参照系中，并且同时将两个时钟指针在钟面上的位置都解读为指针的偏转角 θ。那么根据相对论，则在静止参照系 K 中的观察者看来，运动参照系 K' 中时钟指针的偏转角 θ' 的偏转速度相对变慢了，而时钟指针偏转角的偏转速度的相对变慢与时间的相对变慢显然没有任何关系，导致这种现象发生的原因完全是由于运动参照系中的空间，相对于静止参照系中的观察者发生膨胀，从而使时钟的钟摆在摆动过程中行程相对增大，因此从效果上看是时钟指针偏转角的偏转速度的相对变慢。显然，相对于静止参照系中的观察者而言，静止参照系中时钟的偏转角 θ 与运动参照系中的时钟的偏转角 θ' 之间的关系为 $\theta'=\frac{\theta}{\sqrt{1-\beta^2}}$。也就是说，这里由于我们将时钟指针的指示值解读为指针的偏转角 θ 而非如通常人们所做的那样解读为时间 t，因此，原先被认为是用于描述时间相对膨胀的公式其实完全可以被解读为只是时钟指针偏转角的相对膨胀，也就是说相对论中所说的时间的相对膨胀完全可以通过重新解释而消解掉，即所谓的时间的相对膨胀完全是对物质变化过程的相对变慢规律的错误诠释，其本质就是物质变化过程的相对变慢。由此可见，时钟的偏转角相对变慢的本质就是空间的相对膨胀所导致钟摆的运动路径的增大，这里的一切并不需要用时间膨胀(或时间变慢)来解释，特别是变化过程的相对变慢与时间无关，因此，所谓时间的膨胀或变慢的观点是对相关现象的错误诠释。

除了上面所介绍的使用周期性的物质变化过程来描述任意物质的变化过程的方法之外，实际上我们还可使以用物体的匀速直线运动为标准来描述任意的物质

的变化过程。我们知道，光在惯性系所在的真空中的运动速度是恒定值 C，而且光子在真空中的位移 $\tau=Ct$ 与时间 t 之间存在一一对应的关系，所以原则上我们还可以使用光随时间不断增加的位移代替时间概念来衡量、描述所有其他的物质的变化过程。例如，在麦克斯韦的电磁场方程及狭义相对论中，如果我们用光子的位移 $\tau=Ct$（τ 的量纲是长度）代替时间 t，则物体的运动速度为：

$$\beta=\mathrm{d}S/\mathrm{d}\tau=\mathrm{d}Vt/\mathrm{d}Ct=V/C$$

即可以用物体的运动速度与光的运动速度的比值、物体相对于光的速度 $\beta=V/C$（是无量纲的数值）代替物体的运动速度 V 来描述物体运动的快慢；则物体运动的加速度为：

$$a=\lim_{\Delta\tau\to 0}\mathrm{d}\beta/\mathrm{d}\tau=\mathrm{d}^2S/\mathrm{d}\,\tau^2$$

而如果同时假定光的运动速度为 1，则可以用光的位移概念表达物体的速度、加速度、能量、动量等物理量。

例如，由于光的运动速度是恒定的，因此借助真空中光的位移公式 $\tau=Ct$，则上面提到的物体位移公式可以表达为：

$$S=\int_{t_0}^{t_1}\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t \;\underline{\underline{\overset{t\to\tau=Ct}{t_0\to\tau_0,t_1\to\tau_1}}}\; \int_{\tau_0}^{\tau_1}\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}\tau}\mathrm{d}\tau$$

又如，在洛伦兹变换中，令 $\tau=Ct$，则物体的运动速度为 $\beta=\mathrm{d}S/\mathrm{d}\tau=V/C$，则显然有：

$$x'=\frac{x-\beta\tau}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\tau'=\frac{\tau-\beta x}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

式中，τ 为光在惯性系所在的真空中的运动路程。显然，洛伦兹变换的这种表达式才真正呈现出 x' 与 τ'（而非 t'）、x 与 τ（而非 t）之间严格的对称性。通过类似的方法将狭义相对论中所有的物理方程进行重新表达后所谓的时间膨胀公式的意义变得非常清晰，其意义是：对于不同的参照系 K 及 K' 中的观察者而言，光的运动路程 $\Delta\tau'=\dfrac{\Delta\tau}{\sqrt{1-\beta^2}}$（而非时间 t 本身）具有相对性。显然，这一结论可以推广到一般物体在空间中运动的情况。

再如，如果令 $\tau=Ct$，则运动速度 u、u'、v 可以重新表述为 $\beta_u=u/C$，$\beta'_u=u'/C$，$\beta_v=v/C$，从而狭义相对论中的速度叠加公式可以表达为：

$$\beta_u=\frac{\beta'_u+\beta_v}{1+\beta_{u'}\beta_v}$$

如在带电粒子在电磁场中的运动过程所受到的电磁力作用的表达式中，令 τ

$=Ct$，则带电粒子的运动速度为 $\beta=V/C$，则有：

$$F=eE+e\beta\times H$$

而对于经典电磁理论中的麦克斯韦方程组，如果令 $\tau=Ct$，则电磁场中电流元的运动速度为 $\beta=V/C$，则方程组可以重新表达为：

$$\nabla\cdot B=0$$

$$\nabla\times E=-\frac{\partial B}{\partial\tau}$$

$$\nabla\cdot E=4\pi\rho$$

$$\nabla\times B=\frac{\partial E}{\partial\tau}+4\pi\rho\beta$$

其中，$\nabla=\frac{\partial}{\partial x}i+\frac{\partial}{\partial y}j+\frac{\partial}{\partial z}k$ 为梯度算符，E 为电场强度，B 为磁感应强度。

如果麦克斯韦电磁场方程用狭义相对论中的张量进行描述，则同样可以表达为不显含时间 t 的形式，同时具有更严格的对称性。另外，由于在狭义相对论中一维时间是以 $i\tau(=iCt)$ 的形式与三维空间结合并构成一个整体，即四维时空的，而所有描述物质的变化过程的方程都是在四维时空用张量建立起来的，同时，如果将物体的运动速度、加速度等分别定义为 $V_n=dx_n/d\tau$、$a_n=d^2x_n/d\tau^2$（$n=1$、2、3、4）等，那么所有这些物理方程都可以表达为不显含时间 t 的形式；与狭义相对论的情况类似，广义相对论同样是用四维时空概念来描述物质的变化过程的，而四维时空中的时间坐标是用 $x^0=Ct$ 来表述的，某一时空点附近的时空间隔则用 $dx'^\mu=a^\mu_\gamma dx^\gamma$ 或 $dx^\mu=b^\mu_\gamma dx'^\gamma$（其中 $\mu,\gamma=1,2,3,4$）来表示，描述物质的变化过程的物理量则是用张量表述的，如果同时将时间 t 用 x^0（$dx^0=C\mathrm{d}t$）表示，将使得广义相对论中的主要方程（如爱因斯坦的场方程 $R_{ik}-1/2g_{ik}R=\kappa T_{ik}$）被表达为不显含时间 t 甚至可以不需要时间量纲的形式。除此之外，我们还可以将其他所有物理量及物理方程进行类似的“改造”，使这些方程的数学表达式不显含时间参数 t。总之，将时间参数 t 用光的位移 $\tau=Ct$ 来代替，可以得到所有相对论中的不显含时间 t 的新的物理方程表达式，而且这种表达式与原表达式是完全等效的，意义也完全类似。

由于几乎所有物理学理论都可以用相对论的形式进行表达，因此原则上我们可以将这种方法推广至几乎所有物理学的方程中建立所谓的不显含时间的物理学。正因为我们可以借助物体匀速运动的运动路程作为自变量实现对任何物质变化过程的描述，而时间的倒流变换又无法导致任何物体运动方向的逆转，从而以物体的匀速运动的位移（线位移或角位移而非时间 t）为自变量描述物质变化过程的物理方程同样具有时间倒流变换不变性，而且用这种方式表达描述最基本的物质变化过程的物理方程，具有时间反演变换不变性以及描述热力学过程的物理方程导致时间反演变换的对称破缺。同样的，我们还可以对不显含时间而是以时钟的

角位移或物体的匀速直线运动为自变量的物理方程直接进行相应的反演变换研究，而且可以获得与物理方程的时间反演变换完全类似的结论，由于具体方法与时间反演变换的基本相同，我们在此就不作进一步的讨论。

由此可见，我们借助物质的周期性变化过程（如物体的周期性旋转运动）或均匀的物质变化过程（如物体的匀速直线运动）作为物质变化过程的测量单位乃至自变量，原则上可以将所有显含时间参数 t 的物理方程都转化为没有或不显含时间参数 t 并且与原方程完全等价的物理方程。当然，我们这里列举的都是一些比较特殊的方法，实际上，已经有物理学家提出了建立不显含时间参数 t 的物理方程的更一般方法，如意大利物理学家卡尔罗·罗威利在其著作中对此就有简单的论述："如果我们想要以并不熟悉的理念更加广泛地去了解世界，就必须放弃牛顿的理论框架，因为它不再成立。特别是这样一种理论已经不再有效，即时间 t 自身在流逝，而与之相应的其他一切都在变化。不能使用在时间 t 中变化的公式来解释世界。当一位物理学学生初次遇到这个想法，他会感到如坠雾里云中，不包含时间 t 的公式，那么怎么去解释整个体系的变化呢？他会逐渐明白，时间变量绝非必不可少。与其把一切都与牛顿发明的这个小把戏，既抽象又绝对的"时间"相关联，倒不如依据其他变量的状态来解释每一个变量。为此，我们必须只着眼于我们确实观察到的这一系列变量 A、B、C 等，并在这些变量之间建立起联系，也就是说，是 $A(B)$、$B(C)$、$C(A)$ 这些函数的方程式，这是我们观察到的，而不是我们没有观察的 $A(t)$、$B(t)$、$C(t)$ 这些函数。在上面的例子中，我们可以不需要脉搏和钟摆，它们都是在时间中变化的，而只使用能向我们说明每个变量相互之间如何变化的公式，即某一变量的哪些值是与另一变量的某些值相吻合的。与空间一样，时间也变成了一种相关性的概念，它只是表述了事物的不同状态之间的关系。尽管这只是一个简单的变化，但在概念上却迈出了一大步。我们必须学会另眼看待世界，而不是只想着事物随着时间改变。从根本上讲，时间是虚无的。世界的新面貌正在进入到基础物理学，即这个世界既无空间，也无时间。通常意义上的空间和时间将统统从基础物理学中消失，正如'宇宙中心说'也不再能够科学地描述世界。那么我们真的可以毫不考虑时间而研究世界吗？真的可以完全不考虑时间而探究我们的这个世界吗？我认为是可以的，但这是我们思想观念上的一次彻底革命[①]。"

虽然卡尔罗·罗威利依据其所设想的方法建立了不显含时间参数的正则量子引力理论，但他关于时间是虚无的观点，我们认为是不正确的。由于物质的状态从而描述相应状态的物理量都是变化的，同时由于任何变化都具有时间性，因此卡尔

---

① [意]卡尔罗·罗威利. 假如时间不存在——讲点颠覆常理的科学[M]. 李润，译. 北京：化学工业出版社，2013：94—95.

罗·罗威利提出的方法中所涉及的变量，本质上就是时间的隐函数，从而同样也是时间的函数必定会随时间而发生变化，不论这种函数关系是否被表达出来，都不会改变这一事实。也就是说我们可以用任何一种变化规律已知的物质变化过程为标准，对所有物理学方程进行重新表述，进而得到相应的不显含时间的物理方程，乃至重建所有不显含时间参数，从而在数学形式上“没有”时间参数 t 的同时也不具有时间量纲的物理学，而这并不意味着时间消失在物理方程中，消失在描述物质变化过程的符号里并最终消失在物质的变化过程中，从而成为一个虚无的概念，而仅仅意味着时间隐含在一切物质的变化过程中，是任何描述物质变化过程的物理方程的隐参数。在此需要特别指出的是，即使那些被认为是时间不存在的例子从本质上而言并没有证明时间的不存在而仅仅说明了时间是隐含在物质的变化过程中的对象，如意大利物理学家卡尔罗·罗威利在其著作中所说：“然而，假如时间不存在的话，还能谈论时空吗？是的，在费因曼的计算范围内是可以的。首先，在这项理论的基本方程式中不存在时间并不妨碍我们作出精确的预测。例如，预测某个下落物体在‘5 秒钟之后’的位置，我们可以把它描述成‘钟摆摆动 5 次后’的坠落。尽管在实践中差别很小，但在概念上则差别巨大，因为这种方式使我们摆脱了各种不同时空形态的约束[①]。”正如我们在上面的分析中所指出的，时钟指针在钟面上的位置可以作不同的解读，而且这些不同的解读对描述物质的变化过程而言都是完全等效的，从而将钟表时间解读为钟摆摆动次数的方法并没有将时间从根本上消除掉而仅仅是将显含时间的表达方式转换为不显含时间的表达方式，而且物质变化过程的时间性也不会因为这样的表达方式而被彻底消解掉。实际上除了物理方程可以表达为不显含时间的形式之外，我们的日常语言同样也可以转换成不需要时间概念的表达形式，由于相应的转换比较繁琐，我们在此就不做详细论述了。显然，在不显含时间的物理方程以及日常语言的表达形式中永恒的、持续不断进行着的物质的变化就是一切，从而时间的方向性以及时间的流动性对物质变化过程的作用以及相应的观念都成为不必要的、多余的内容，相应的问题也因此化为乌有，我们所面对的一切都仅仅是不断进行着的具有方向性的物质变化过程，或者都只能归结为从未来到现在再到过去不断发生(或流动)的物质的变化过程。但由于一切物质的变化仍然具有时间性，因此时间不可能因为我们的表达内容中不显含时间而消失，特别在这种情况下，物质变化过程的时间性成为时间最重要而且是唯一的内容。虽然所有物理学方程可以完全表述为不显含时间甚至不具有时间量纲的形式，但人们还是更习惯于显含时间形式的物理学方程。在显含时间的物理理论中，时间参数 t 被作为一切被描述的物质变化过程的参照标准，从而复杂的物质

---

① [意]卡尔罗·罗威利. 假如时间不存在——讲点颠覆常理的科学[M]. 李润，译. 北京：化学工业社，2013：107.

变化过程所具有的方向性(而非时间的方向性)必定是相对于无方向性的时间而言的,而所谓的一切物质的变化过程所具有的从未来到现在再到过去这种表现形式(而非时间的流逝性),则是相对于没有流逝性的时间而言的,特别是时间的测量值具有相对性,则是相对于不具有相对性的时间本身而言的。

我们知道,任何物质的变化过程都具有时间性,而所有的物理方程都通过一定方式实现着对相应的物质变化过程的描述,因此描述物质变化过程的物理方程必须通过时间参数 t 反映物质变化过程的时间性,这也就意味着通常情况下时间参数 t 对所有描述基本物质变化过程的物理方程而言,最终都是必不可少的。通过上面的讨论我们知道,由于时间隐含在一切物质的变化过程中,因此对显含时间参数 t 的物理方程,我们都可以通过一定方式将其变换为不显含时间参数 t 的方程。但这并不意味着时间概念对于物质的变化过程、对于描述物质变化过程的物理方程而言是没有意义的,实际上,即使在不显含时间参数 t 的物理方程中,时间仍然在间接地起着至关重要的作用,可以说没有时间就没有物质的变化过程。虽然如此,但是有些描述具体物质变化过程的物理方程从数学形式上看就完全不显含时间参数 t(正则量子引力论以及由之衍生出的圈量子引力理论就是这样的实例),那么这样的物理方程是否能正确反映以及通过怎样的方式反映相应的物质变化过程的时间性呢?对于这样的物理方程我们应该如何理解呢?从数学的结构形式上看,著名的惠勒—德威特方程就是不显含时间参数 t 的物理方程的一个实例。惠勒—德威特方程 $\hat{H}|\psi\rangle=0$ 是描述整个宇宙的波函数 ψ 必须满足的规范量子引力理论中最重要的方程,是爱因斯坦场方程的量子化表达形式,其中 H 是量子化广义相对论中的哈密顿约束,并且有:

$$H=-GaP_a{}^2/3\pi+a^3P_\varphi{}^2/4\pi^2-3\pi a\{1-(8\pi G/3)a^2\cdot V(\varphi)\}/4G$$

$\hat{H}$ 与非相对论性量子力学中的希尔伯特空间不同,它是作用于希尔伯特空间中的各个波函数上的算符,并且有:

$$\hat{H}=\{\partial^2/\partial a^2+\frac{p}{a}\partial/\partial a-(3/4\pi G)\frac{1}{a^2}\partial^2/\partial\varphi^2-(3\pi/2G)^2a^2\cdot[1-\frac{8\pi G}{3}a^2V(\varphi)]\}$$

式中,$a(t)$ 为宇宙尺度因子;$V(\varphi)$ 为均匀各向同性标量场 $\varphi(t)$ 的自作用势;G 为引力常数;P_a 及 P_φ 为分别与 a 及 φ 共轭的正则动量,$P_a=\partial L/\partial\dot{a}=-3\pi\dot{a}a/2G$,$P_\varphi=\partial L/\partial\dot{\varphi}=2\pi^2a^3\varphi$。而在哈密顿算符 $\hat{H}$ 中,动量 P_φ 及 P_a 也进行了算符化,即 $P_\varphi\rightarrow-i\partial/\partial\varphi$,$P_a\rightarrow i\partial/\partial a$;$|\psi\rangle$ 是定义于时空整体的场结构的泛函,它包含了所有关于宇宙几何以及物质内涵的信息。这样,惠勒—德威特方程的物理意义是在一个具有时间尺度不变性的理论中哈密顿算符等于0。从方程的形式看,惠勒—德威特方程显然是一个关于变量 a 及 φ 的偏微分方程,其特点是不显含时间参数 t。

有的学者(包括意大利的卡尔罗·罗威利及英国的朱利安·巴布尔等在内的物理学家)根据惠勒—德威特方程的形式特征将其作为否定时间及时间概念的客观性的证据,如英国哲学家克怀格·卡伦德在其著作中就有过相关的描述:“在规范量子重力中很容易解释时间问题—根本不存在时间问题!这套理论的主要公式叫做惠勒—德威特等式 $\hat{H}|\psi\rangle=0$,它描绘了一个完全静态的宇宙。它在量子力学应用于广义相对论的过程中产生。但该等式缺乏时间支撑[①]。”因此,英国物理学家戴维斯认为:“在某种意义上能量的大小决定着时间流逝的速率——如果你喜欢,你可以把它称作量子时钟的节拍。没有能量就意味着时钟停止滴答作响:时间莫名其妙地彻底从物理的描述中退出。所以,如果这样处理,量子宇宙学根本不涉及时间:实际上,时间也完全消失了……就像神秘主义者改变自己意识状态一样,量子宇宙学也肯定无疑地废除了时间[②]。”戴维斯还认为:“我们能够设想在宇宙大爆炸之初,时间根本不存在。仅仅由于宇宙的量子状态是罕见的,使时间以一种近似方式浮现出来——正如某种废墟从初生宇宙的永恒的原始大涨落中浮现出来。或许看上去使人惊慌的是,量子物理学在大爆炸之初就废除了时间[③]。”

针对上述情况,物理学家们一直在努力试图探究时间在规范量子引力理论中的真实意义,正如克怀格·卡伦德在其著作中所表述的:“有一些人(包括本书作者)建议我们应该为等式添加一个‘外部时间’,这个观点认为惠勒—德威特方程等式是对问题不完整的解释,(因此)应该加入第二个基本等式,这个加入的等式自然会产生一个新的时间变量。另外一些人认为数学描述或规范量子重力的‘形态主义’完整无缺。可是它掩盖了一个藏匿其中的未被察觉的时间变量或‘主时钟’。这些人彻底搜查了形态主义,寻找可能扮演时间角色的东西(我们为解释所观察到的变化而依赖地某个钟)[④]。”

还有学者则提出由于宇宙尺度在惠勒—德威特方程中起着与时间类似的作用,因此在方程中时间可以重新获得其相应的意义,物理学家杜欣欣和吴忠超在其著作中就提出了类似的观点:“在经典广义相对论中,研究宇宙的演化则必须利用爱因斯坦方程,这时宇宙演化被描述成从早先的三维空间向后来的三维空间过渡,其时间的含义被隐含在夹在这两个三维空间之间的四维时空。而在量子物理的框架中,这个演化由宇宙波函数来描述,波函数必须服从惠勒—德威特方程。因为在闭合宇宙之外,不存在一个独立的时间,所以物理时间不在这个方程中显现。但是在这个方程中自动出现一个和物理时间类似的变量,这就是宇宙尺度,所以宇宙的

① [英]克怀格·卡伦德,拉尔夫·艾德尼.视读时间[M].张颖,译.合肥:安徽文艺出版社,2007:163.
② [英]保罗·戴维斯.关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M].崔存明,译.长春:吉林人民出版社,2002:244.
③ [英]保罗·戴维斯.关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M].崔存明,译.长春:吉林人民出版社,2002:244.
④ [英]克怀格·卡伦德,[英]拉尔夫·艾德尼.视读时间[M].张颖,译.合肥:安徽文艺出版社,2007:165.

尺度在量子宇宙学中起着时间的作用，我们称之为宇宙时间①。”

实际上，由于该方程将整个宇宙的波函数 ψ 作为对象进行描述，而泛函 $|\psi\rangle$ 本身就包含了整个宇宙的空间结构及其所有物质的运动、变化的状态等全部信息，并且由于宇宙至大无外、至小无内，除了宇宙中的物质的存在及其变化过程之外再也没有其他事物存在着，也就是说宇宙中物质的存在及其变化过程就是一切，其存在及变化过程本身就具有自足性及时间性。因此，对该方程而言，整个宇宙的变化就是一切，时间及时间概念则是内在于这种变化的。正如戈登·贝洛特和约翰·厄尔曼在其《前苏格拉底量子引力论》文章中所说：“参数化粒子的量子理论与普通的未参数化粒子的量子理论密切相关。现在，广义相对论的标量约束含有动量的二次方，而对参数化粒子的约束与 p_i 是线性关系，所以惠勒—德威特方程甚至形式上都不是一个薛定谔方程——它不能解出量子态随时间的变化率。尽管如此，巴门尼德主义者仍然声称，类比于参数化粒子的量子约束，应认为惠勒—德威特方程暗含着与量子引力相关的时间和变化的所有信息（因为直观上看，两者都是生成时间演化的经典约束的量子化版本）②。”

另外，由于任何物质的变化过程都具有时间性，而时间概念是从变化过程的时间性中抽象出来的，正如黄裕生教授在其著作中引自海德格尔的《存在与时间》中的观点：“到时的时间性或时间性的到时就是时间……时间性总要到时，总要展现为时间，也就是总要展现为某种时机或界域③。”因此，只要有运动及变化，就必然隐含着时间性及时间，而由于宇宙万物自产生那一时刻起直至消亡都处于永恒的变化过程中，从而时间必定随着宇宙间万物的产生而产生，同时也将随着宇宙间万物的消亡而归于乌有。

由于宇宙尺度因子 $a(t)$ 是时间参数 t 的函数，从而 $a(t)$ 本身就是随时间而不断变化的；再者，由于标量场 $\varphi(t)$ 也是时间参数 t 的函数，同时“没有先验的理由判定标量场的动量值很接近于零”④，从而标量场 $\varphi(t)$ 本身也处于随时间而连续性变化的状态之中。而由于量子化广义相对论中的哈密顿约束 H 是关于变量 a 及 φ 的函数，因此哈密顿约束 H 必定是时间参数 t 的隐函数；另外，由于作用在希尔伯特空间中的各个波函数上的算符 $\hat{H}$ 是关于变量 a 及 φ 的算符，因此算符 $\hat{H}$ 必定是关于时间参数 t 的隐算符。也就是说在惠勒—德威特方程中时间参数 t 并未消失（或并非不存在），而是被隐藏到了相关的变量及算符中，从而隐藏到了整个宇宙

---

① 杜欣欣，吴忠超. 无中生有——霍金与《时间简史》[M]. 长沙：湖南科学技术出版社，2010：47.

② [美]克雷格. 卡伦德，尼克. 郝盖特编. 物理与哲学相遇在普朗克标度[M]. 李红杰，译. 长沙：湖南科学技术出版社，2013：238.

③ 黄裕生. 时间与永恒[M]. 南京：江苏人民出版社，2012：111.

④ 范祖辉，俞允强. 标量场的动量与宇宙波函数[J]. 天体物理学报，1991，11(2).

的变化过程里。由此可见，实际上惠勒—德威特方程 $\hat{H}|\psi\rangle=0$ 本身就隐含了时间参数 t，因此该方程描述的对象必然会随时间 t 而发生变化，同时该方程的存在也表明宇宙并非静态的而是不断变化的。

在此需要特别强调说明的是，正是在惠勒—德威特方程的基础上物理学家建立了圈量子引力理论，而基于圈量子引力理论，美国理论物理学家马丁·波乔瓦尔德建立了关于宇宙的波乔瓦尔德模型，并同时借助该模型描述了宇宙从其前一个引力坍缩过程转变为宇宙大反弹的宇宙演化模式，这也就意味着由圈量子引力理论描述的宇宙完全是一个动态的宇宙，从而描述整个宇宙状态的惠勒—德威特方程揭示的完全是一个动态的宇宙，也就是说惠勒—德威特方程本身就隐含着被方程所描述的整个宇宙的所有变化。因此，所谓的时间 t 本身就隐含在整个宇宙的变化过程中，隐含在描述整个宇宙的变化过程的物理方程里，这就意味着根本不需要而且也不可能存在一个“外在于”宇宙及其变化过程的时间及时间概念，换句话说，时间不可能存在于宇宙及其变化过程之外。由于我们无法从外部引进一个独立于惠勒—德威特方程的时间，这也就意味着时间不可能独立于被该方程所描述的宇宙而存在。

可见，惠勒—德威特方程并非时间不具有客观性的证明，充其量只是证明了借助时钟测得的时间测量值（即非本己时间），完全可以用其他变量所代替，因而不具有客观性，但时间本身（即本己时间）在一切物质的变化过程中所起的作用则是任何对象都无法取代的，该方程其实是宇宙的变化过程具有时间性，从而时间隐含在宇宙的所有变化过程中，并且不可能独立于这些变化过程而存在的有力证据。

也就是说对于原本就不显含时间参数 t 的物理方程，由于这些方程是用于描述相应的物质变化过程的，而一切物质的变化过程都具有时间性，同时，物质的变化本身就是在原则上能够被人的感官或仪器所观察到的状态的差异，如果这些差异是同时出现的，则必定不能够显现出来，从而被我们观察到，这就意味着只要涉及物质的变化，就必然蕴涵着时间性以及时间的涵义在其中（也就是说物质的变化是本源的，有了物质及其变化的同时，才有时间，而不是有了时间才会有变化），并且由于相应的物理方程中涉及的描述物质变化过程的物理量（而非时间）本身会发生自主的变化，这种变化不需要上帝之手，更不需要时间去推动，这也就意味着将时间 t 作为自变量并不是必须的，因此，描述物质变化过程的不显含时间的物理方程本身就无条件隐含了时间要素，从而时间参数对这些方程而言并非必须要使用的。可以说在任何不显含时间参数 t 的物理方程中时间 t 并没有消失，更没有从一切物质的存在及其变化过程中独立出去，而是隐含在描述物质的运动及变化过程的物理方程里成为所谓的隐参数，从而同样隐含在物质的变化过程中，因此在没

有任何物质的变化发生的空无一物的宇宙空间中，时间也不可能存在。因为任何物质的变化过程都具有时间性，这也就进一步说明时间隐含在一切物质的存在及变化过程中，只要方程描述的对象是物质的变化过程，那么不论方程涉及多少变量、形式如何复杂，时间都必然无条件地隐含在方程里，隐含在物质的存在及变化过程中，物质的存在及变化就是一切，不可能存在超越并独立于物质的存在及其变化过程的所谓绝对时间。从而，要描述物质的存在及其变化过程不需要从变化过程的"外部"引入时间概念，也可以说物质的变化过程不需要一个外在于变化过程的时间（概念），即物质的变化过程本身就要实现对其进行科学的描述而言是自足的。因为在一切物质的变化过程中，原本就隐含着时间，所以，我们不可能直接而是必须通过物质的变化过程才能间接地感知到时间以及对其进行间接测量。

由此可见，时间不是一个独立于物质的变化过程的实体，正如黑格尔所说：（物质的）运动（即变化）是时间与空间的统一，时间和空间作为（物质的）运动的两个环节不可分割且相互联系。也就是说时间概念只不过是人们为了便于描述物质的变化过程在不知不觉中从物质的变化过程中分离出来的，实际上这一将时间从物质的变化中分离出来的过程是自古希腊时期开始的，从古希腊时期思想家的残篇中可见早期的古希腊思想家是没有时间概念的，他们充其量将时间等同于天球（物体）的运动，而到了亚里士多德时期，将时间概念从物质的变化过程中分离出来的过程才基本完成。而正因为将时间概念从物质的变化过程中分离出来经历了一个漫长的过程，从而会使得人们遗忘其由以产生的根源并最终可能将时间看做独立于物质的变化过程的一个实体；与将时间概念从物质的变化中分离出来的过程恰恰相反，当科学家重新将时间概念整合到物质的变化过程并在不经意之中将时间隐藏到物质的变化过程中时，又会为时间的突然消失感到惊慌失措，并因此对时间概念加以否定，从而认为时间是不存在的，殊不知正是由于一切物质的变化过程具有时间性，从而时间本身就隐含在一切物质的变化过程之中，也即物质的运动及变化就是一切，而时间则是从物质的变化中派生出来的基本概念。

综上所述，我们可以得出结论，时间是不同于同时又隐含在（即内在于）物质的变化过程中的对象，也就是说由于时间不是外在（或独立）于物质变化过程的对象，因此，为了描述任何物质变化过程的规律性，我们不需要在物质的变化过程之外重新引入时间概念。实际上，我们得到的这一结论与海德格尔所坚持的观点是完全一致的，正如罗嘉昌先生在综合论述海德格尔的学说时所说："和物理时间不同，海氏主张的这种原始的、本真的时间并不是按过去、现在、未来这样的方向一维地无限展开的，它不是外在于事物存在的均匀流动的河水，能让事物在这种时间之流中生灭。海德格尔激烈反对对时间的这种解释，坚持认为时间不是外在于事物的'东西'（存在者），不是外在于此在生存的'序列'。真正的时间是使"存在"成为"存在

者”的过程，是此在的诸种生存方式实现出来的境域。时间性深深内在于此在的生存之中。并不是此在生存在时间中，而是时间在此在的生存中[1]。”正是由于一切物质的存在及变化过程本身都具有时间性，从而时间隐含在一切物质的存在及变化过程中，因为有了这一前提，所以对于描述物质的存在及变化过程而言，我们完全可以不使用时间参数 t 而实现对任何物质变化过程的描述，这就意味着对描述物质的变化过程而言时间 t 并非是一个必需的参数，也就是说物质的变化过程本身就是自足的。并且只有将物质的变化过程作为第一性的概念，而时间是隐含及从属于物质变化过程的概念，我们才能真正理解时间不具有流动性的观念。

特别的，从时间隐含在一切物质变化过程中并且是其隐参数这一结论可知，对于不显含时间参数 t 并且用于描述不可逆的物质变化过程的物理方程而言，物质变化过程的不可逆性显然与时间参数 t 无关，因而不可能是时间所具有的性质，而只能是被描述的物质变化过程所具有的性质。由于我们可以借助具有匀速特性的光的位移作为自变量实现对物质变化过程(同样的也包括热力学变化过程)的描述并建立相应的物理方程，并且如果将以光的位移为自变量对热力学变化过程进行描述的物理方程进行光运动反演变换(对应于时间反演变换)，那么与相应的时间反演变换的结果类似，热力学方程同样具有光运动反演对称破缺，而这种情况明显与时间无关。这也从另一个角度进一步证明时间是没有方向的，因而所谓的单向性完全是物质的变化过程本身所具有的性质，而所谓的流动性则是由于物质的变化过程从未来到现在再到未来的表现形式在人的意识中所产生的时间具有流逝性的幻觉。而如果我们不考虑将时间作为描述物质的存在及其变化过程的参数，则将一个具有时间性从而隐含着时间的、具有均匀性或周期性的变化过程甚至是随意一个非均匀性或非周期性的物质变化过程作为参照标准，对描述任何物质的存在及变化过程而言是绝对必要、不可或缺的。

3.3 关于时间的本质

前面我们详细讨论了物质的变化过程与时间之间的不同之处以及两者之间的密切关系，但这些讨论对于解决时间的本质问题而言肯定是不够的，在进行时间的本质问题的讨论之前我们还需要逐一考察迄今为止人类历史上那些最重要的思想家所提出的关于时间的本质的重要论述，并对相应的观点进行较为详细的分析，从而使我们能够在前人所提出的观点中得到重要启示，并且能够清楚地认识到哪些问题已经得到了很好的解决，还存在哪些需要解决的问题，从而对我们后面的讨论提供全面的参考，为最终解决时间的本质问题奠定坚实的基础。

---

① 罗嘉昌.从物质实体到关系实在[M].北京:中国人民大学出版社,2012:121.

3.3.1 人类历史上关于时间本质的一些重要论述

人类历史上第一个系统思考时间的本质问题的是古希腊伟大的哲学家亚里士多德，亚里士多德对时间的本质系统的论述，至今仍然影响着众多的哲学家及科学家对时间本质问题的思考，下面我们来考察亚里士多德关于时间的本质——时间是运动的数——的论述过程。

亚里士多德在其著作《物理学》中通过简单的分析作出"时间既不是运动，也不能脱离运动"的结论，另外依据"我们是同时感觉到运动和感觉到时间的"，得到"时间或为运动或为'运动的某某'，既然它不是运动，当然就只能是'运动的某某'了"的结论。"而时间是通过运动体现的：运动完成了多少总是被认为也说明时间过去了多少"。并且由于"运动有前后"，而"时间和运动总是相连的，所以时间里也有前后"，以及"当我们用确定的'前''后'两个限来确定运动时，我们也才知道了时间。也就是说，只有当我们已经感觉到了运动中的前和后时，我们才说有时间过去了。并且，我们是通过辨别前一个限和后一个限以及两个限之间的（有别于两个限本身的）一个间隔来确定它们的。因为，在我们想到两端有别于其间的间隔，理性告诉我们'现在'有两个——前和后——时，我们才说这是时间，因为以'现在'为定限的事物被认为是时间"。"当我们感觉到'现在'有前和后时，我们就说有时间。因为时间正是这个——关于前后的运动的数"。"因此，时间不是运动，而是使运动成为可以计数的东西"。确切地说，"时间是被数的数，不是用以计数的数"①。因此，从本质上来说"时间作为运动的数，它是运动的性质或状况"②。

显然，在亚里士多德的论述中，从前提到"时间是运动的某某"的分析基本是相对严格的，说明时间与运动具有密不可分的关系。但在接下来的论述过程中就不存在严格的逻辑关系，并且所得到的结论中所说的"运动的数"本身就是一个含义非常模糊的概念，据此人们根本无法理解时间到底是什么，因为"运动的数"本身就具有歧义性，对其可以作出不同的解释，比如可以解释为物体的运动所经过的路程（这一点从亚里士多德的论述中可以看出），因为对物体运动的路程通过测量可以以数量的形式表达出来，而这种数量同样可以被理解为运动的数；当然也可以解释为物体的运动经过一段路程所需要的时间，我们借助时钟对这一段时间进行测量后所获得的数值可以被理解为运动的数。

从亚里士多德关于时间的本质的定义中我们无法将时间与空间区别开来，从而我们无法将亚里士多德关于时间的本质的定义作为正确的定义，并且从这一结论出发既可以将时间理解为具有客观性的对象，也可以将时间理解为具有主观性

① [古希腊]亚里士多德. 物理学[M]. 张竹明，译. 北京：商务印书馆，1997：124－125.

② [古希腊]亚里士多德. 物理学[M]. 张竹明，译. 北京：商务印书馆，1997：135－136.

(是由人的意识创造)的对象，后人对时间的本质各种不同的理解多源自这一结论的模糊性。而通过上面对亚里士多德对时间本质的分析过程可见，在其相关的分析中明显将“过去”、“现在”、“未来”这些属于物质变化过程表现形式的内容强加于时间，因此亚里士多德关于时间的本质的定义是不可能正确的。

18 世纪末 19 世纪初的德国古典唯心主义哲学家康德关于时间的本质的论述同样具有代表性。下面是康德对时间的本质的论述：“时间不是独立的实体，也不是事物的一种客观确定，因而从一切直观的主观条件抽象出来之后，它是不再存在的。如果它是一种独立的东西，纵使它实际上不是意识的对象，它也会是实在的了。如果它是在事物本身的一种确定性或秩序，它就不会先于我们对于那种事物的直观而作为这个直观的必要条件，它并不能靠综合判断而为我们所知道。如果时间只是主观条件，没有它我们就不能有任何直观，那么这样的判断的可能性便立即成为可以理解的了。因为这样，我们意识到对象之先就可意识到内部直观的这个形式，因而是验前地被意识到的”。“时间无非是内感官的形式，就是说，对于我们自己和我们的内部形态的直观形式。它既然毫不影响一个对象的形状或地位，所以时间不能是外面出现本身的一种确定；它所确定的，是我们内部形态中表象的关系。因而因为这内部直观没有它自己的形状，我们便以空间的种种类比来设法弥补这个缺陷。于是我们想象时间的次序作为一条向无限前进的线，其各部分是形成一个系列；我们就从这条线的性质推想到时间的一切性质，只要留心到一点的差别，那就是空间的线之各部分是同时存在着的，而时间的线之各部分是一个跟着一个的后面的。即只从这事实看来，就是时间的一切关系都可以这样在一个外部的直观表现出来这事实，便可明白地看出，时间本身是一种直观”。因此，“毫无例外，时间是一切出现的形式上之验前条件。空间作为一切外部出现的纯粹形式只是外部出现的验前条件。但是一切直观的对象，不管是外部的或内部的，都是心灵的确定，而从这观点来看，都是属于我们内部状态的。既然这内部状态从属于时间，而时间是内部直观的形式的条件，则时间便是一切出现的一种验前条件了：时间是内部出现的直接条件，因而是外部出现的间接条件。既然我能够验前地说一切外部出现都是在空间里面，而依照空间的种种关系验前地被确定着，我因之根据内感官的原理也能够说，很一般地，一切出现都是在时间里面，而且必然地在时间的关系里面”。[1] 康德进一步论述道：“谈到我的内部经验时，时间对于我是有实在性的；换句话说，我实际上意识到时间，意识到我自己的各种确定是在时间里的。因之时间并不作为意识以外的一个对象而是实在的，乃是我自己作为意识的一个对象对我自己而存在的方式，它才是实在的……所以时间不过是我们内部直观的

① [加拿大]约翰·华特生. 康德哲学原著选读[M]. 韦卓民，译. 北京：商务印书馆，1987：32－33.

形式。如果我们抽掉我们感性的特有条件，时间的概念也就消逝了；因为时间并不属于对象，而只属于直观到对象的主体”[①]。在康德看来，时间是我们内感官的形式或内部形态的直观形式，从而时间不属于物质对象而是属于直观到对象的主体，也就是说，康德认为时间是主观性的内容，因而从不具有客观性。

上述康德的论述看似比较严格，其实在论证过程中却在不经意之间将一些未加证明过的、似是而非的前提引入，从而所得到的结论不可能是正确的，比如在一开始时康德就从“时间不是独立的实体，也不是事物的一种客观确定”的前提，不加思索地推论出时间是一种纯粹抽象的、主观的对象；而对于“时间不是事物的一种客观确定”这一结论康德的论证是：“如果它是在事物本身的一种确定性或秩序，它就不会先于我们对于那种事物的直观而作为这个直观的必要条件，它并不能靠综合判断而为我们所知道”，这种论证看似深奥，其实却空洞无物，并没有给出任何令人信服的证明。

康德关于空间及时间的理解完全来源于心理学及神经学对知觉过程描述的启示，“康德思想的决定性转折在于清楚地理解到：知觉绝不仅仅是事物的摹写。我们看到的颜色、听到的声音、闻到的气味都产生于感觉者对本身无色、无声又无味的刺激的特异反应。除非意识变换这些刺激，否则就不可能有知觉经验；因为，例如‘以太振动’的本性本身并不蕴含颜色；“神经刺激”本身也不意味着声音或颜色。但是，如果意识将刺激转变为知觉，则只有靠将它自己的“形式”和状态强加于被转变的东西上才能这样做。而康德的论点是，“我们感觉性的形式”就是空间和时间[②]。”

问题的关键在于康德认为我们知觉的形式完全是主观的东西而与客观实在无关，其实知觉的形式同样也具有客观性，因为知觉虽然不是事物的简单摹写，但其形式却具有客观性。例如我们对物体颜色的知觉，实际上是来自物体表面的特定频率的光刺激我们的感官，在感官产生相应的电信号送达我们的大脑特定的区域后，使我们的意识形成确定的颜色知觉。这里，我们知觉中的“颜色”虽然不直接是外界物体的性质，但却与物体表面的分子或原子、排列方式、密度等相对应，如果没有来自于外界事物各种信号对我们的感官的刺激，就不可能产生相应的知觉，因此知觉的内容与外界物体的客观内容相对应，反映了客观实在。

同样，我们对于时间的知觉可能也像对颜色的知觉一样有其内在的主观形式，但同样与外界事物的变化过程相对应，是外界事物的客观内容在主管形式上的反映，如果外界事物的变化过程没有时间性，我们就不可能形成相应的时间知觉。特

---

① [加拿大]约翰·华特生.康德哲学原著选读[M].韦卓民，译.北京：商务印书馆，1987：35.

② [美]W. H. 沃克迈斯特.科学的哲学[M].李德容，王梅，刘绪平，译.北京：商务印书馆，1996：67.

别是皮亚杰的发生认识论的研究表明，人的时空概念并非先天具有的，而是来源于实践的操作、来源于人类漫长的生产实践活动；这也就意味着康德关于时间的观念并非完全正确。康德在论述中过分强调了时间知觉的主观形式而忽略了与这种时间知觉相对应的客观内容，从而才得到“时间并不属于对象，而只属于直观到对象的主体”的关于时间的唯心主义的结论。

无论康德关于时间的本质问题的论述有多么精彩，由于康德在此所得到的结论与我们前面关于时间的客观性的结论是不一致的，从而我们不赞同康德关于时间本质的最终结论，因为无论如何康德的所有论述都仅仅是哲学的思辨，特别是由于没有现代科学的各种重要成果作为理论支撑，因此，康德的论述是不可能正确的。

在现代科学中，几乎很少有科学家对时间的本质问题进行过深入的研究，因此在科学范畴内迄今为止也没有一个关于时间的完整的定义，或者充其量仅仅是一个实用意义上的操作性定义。特别是现代科学界，实际上经常将时间完全等同于变化，特别是在狭义及广义相对论中，爱因斯坦直接将时间与钟表的测量值等同起来并得到其著名的“时间变慢”或“时间膨胀”公式，最终建立完整的相对论理论体系后，科学家普遍开始将时间直接定义为钟表的测量值。需要指出的是，从我们上面讨论的结果知道钟表的测量值可以解读为与时间完全不同的对象，比如解读为钟表指针转过的角度或指针针尖旋转过的路程，因此相对论中直接将钟表的测量值等同于时间并最终得到“时间变慢”或“时间膨胀”的结论的这种做法是不正确的。当然，除科学家外部分哲学家如英国的 R. L. 普瓦德万也持同样观点(即将时间与变化相等同)：科学家认为，“最自然的是把时间表述(虽然一些哲学家会反对这种表述方式)为事件的变化，即时间慢慢从将来成为现在，然后越来越远变为过去。捕捉上述差别的一种方法是用一级变化和二级变化。一级变化指世界上事物的属性的变化。这里的事物指那些持续存在于时间里的东西，比如树、原子和人，因而二级变化就是通常所谓的事件。时间本身能变化吗？二级变化是或者应该是事件从将来到现在然后滑入越来越远的过去时所经历的变化(因为它是一级变化的变化，所以称为“二级变化”)，那么二级变化也就是时间的流逝[①]。”“所以也许时间和变化就是一回事。运动着的物体，变化着的情感，正在发声的时钟，所有这些都是时间”[②]。显然，这些将时间与物质的变化等同起来的关于时间的本质的定义与前面我们讨论过的关于时间是不同于物质变化过程的对象的结论是相冲突的，因此是不可能正确的。

---

① ［英］R. L. 普瓦德万. 四维旅行[M]. 胡凯衡，邹若竹，译. 长沙：湖南科学技术出版社，2005：17.

② ［英］R. L. 普瓦德万. 四维旅行[M]. 胡凯衡，邹若竹，译. 湖南科学技术出版社，2005：5.

而在现代西方哲学史上关于时间的本质的各种论述中，德国存在主义哲学家海德格尔的巨著《存在与时间》是一个重要的里程碑，因此我们必须给予特别的关注。《存在与时间》是关于"存在"、"时间"以及两者之间的关系的论述，所有的论述以晦涩难懂著称，普通人几乎难以涉猎。对于时间是什么，海德格尔在《存在与时间》中认为：时间是到时的时间性或时间性的到时，而时间性不存在(ist)，只到时。"此在有死有终结，因而有时间性的到时而有时间；此在一旦不再有死，一旦丧失了死这种最本己的可能性，即一旦不再觉悟死亡而显现之，时间性就不再到时，时间就此终结。这不就意味着此在不再存在也就没有时间吗？因为此在丧失了死亡这种最本己的可能性也就意味着此在不再存在。如果此在不再存在就没有时间，那么这也意味着我自己不再在此，时间也就终结①。"对于时间性，海德格尔认为，"时间性不管以何种方式到时，不管展现为何种样式，它都是一种可能性存在。时间性在任何一种存在状态下总还有其他可能存在状态，因而不是现成的存在。从根本上说，时间性存在就是持守着可能性且总是持守着可能性的存在。就此而言，时间性是生存意义上的时间性：它生存着(existiert)，但不是什么。因此，海德格尔说：时间性根本不'是'存在者。时间性不存在(ist)，时间性只到时②。时间性是此在的整体存在的可能性条件，比如，我们已说明，正是'此在持守着死亡这种无关联的可能性'这一本真的时间性才使此在能够作为有决断的自身存在，即才能本真地向死亡存在而是其本真的整体存在。但此在的存在总是被抛的存在：它是且不得不一直是向死亡存在，而且它是且不得不一直是在世界中存在。此在不仅是有死的存在，且是有世界的存在；它向来已被抛向死亡而被抛到一个世界。这是命定的事实(Sache)。因此，作为此在存在的可能性条件，时间性不仅以将来样式到时而展现为持守某种可能性，而且不得不同时以已在('过去')和当前('现在')样式一起到时，从而同时展现为'一直持守着某种可能性而让……来相遇见面'③。而所谓到时也就是到其时机，是……时候。时间性的到时，也就是时间性的展现或显现：展现为是……时机。比如，时间性以当下样式到时，那么它就展现为让……存在的时机，或说，展现为让……作为自身来相遇见面的时机。时间作为时间性的到时也就意味着，时间就是时间性的展现。更确切说，时间就是时间性所展现的时机，而这种时机也就是 Horizont(视界或界域)。时间性总是要到时，总要展现为时间，也就是总要展现为某种时机或界域④。"

海德格尔在其《存在与时间》中在现象学意义上首次将时间与主体的存在(即

① 黄裕生.时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M].南京：江苏人民出版社，2012：117.
② 黄裕生.时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M].南京：江苏人民出版社，2012：110.
③ 黄裕生.时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M].南京：江苏人民出版社，2012：111.
④ 黄裕生.时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M].南京：江苏人民出版社，2012：111.

此在)联系起来,而由于此在有死这种可能性,即此在总是向着死亡存在,总是要死的,因此,此在具有时间性,这一点与我们在第一章中提出的一切物质的存在与变化过程都具有时间性的观点是完全一致的。显然,在《存在与时间》中,时间性作为一个最基本的概念提出的。实际上,时间性不仅在现象学中是一个最基本的概念,而且是一切物质的变化过程的最基本的性质。

另外,海德格尔认为,时间性不是存在者,从而时间性不存在,时间性只到时。实际上,由于时间性不是物质,无法直接向我们呈现出来,从而无法被我们的感官所感觉到,因此时间性不是存在者,但由于一切物质变化的过程都具有时间性,因此时间性最终总是而且必须表现或呈现出是……时候、是……时机的样式,这与我们前面提出的观点是完全一致的。海德格尔将时间性这一最重要的整体性概念用于对时间的本质的论述,完全消除了亚里士多德在其《物理学》中所揭示的时间不断从过去向现在再向未来流逝这种情况导致的悖论,将时间本质问题的理论研究带入了全新的视角。海德格尔在现象学意义上对存在及时间进行了详细的论述,并且将物理学中最重要的参数——时间——也纳入现象学中进行解释,即认为,"通常的时间即所谓物理时间要奠基于这里所说的时间性,没有这里所说的时间性即基于此在之有死有终有限性之上的时间性,物理时间是不可思议的。物理时间本质上是一种测度时间,这种时间之可能当然根源于测度的需要。然而人为何要测要度,海德格尔说这是因为此在对自身的关切而引发。我们测量、计算、管理时间,都是为了节省时间,而节省时间意味着时间是有限的,在'节省'这样的观念里蕴涵着对有限性的先行领悟,因为无限的时间是不需要节省的。物理时间总是以参考系的形式出现的,但这个参考系并不像牛顿所说的那样绝对空洞,它实际上是我们世界中某种关联结构的标志。所有的标度一开始都是关于'是其时''当其时'等具有丰富生存内容的描述,但后来它遗忘了从而抽掉了其中的生存内容,成为一个自在的框子。这种自在的框子沦为空间。在海德格尔看来,空间如同物理时间一样,也应该从此在的时间性中得到解释[①]。"从而从每一个认识主体——人——的视角解释了所感觉到的一切事物的样式。由于海德格尔是从现象学意义上论述时间的本质问题的,因此,相关的结论不可能具有普遍意义,特别是在《存在与时间》中,海德格尔很少论及甚至排斥自然科学中对时间的各种观点以及对时间的各种性质的详细讨论,因此其结论不可能具有广泛的适用性,将时间与此在的死相关联,认为由于此在持守着无关联的、不可逾越的死亡这种可能性,因此只要此在越过了这种可能性,此在就不再存在,从而"将来终结了,不再存在了,因而时间性也就不再以将来样式到时,从而也不能以已在和当前到时,而这也就意味着时间性不

① 吴国盛.时间的观念[M].北京:中国社会科学出版社,1996:248.

再到时，因而不再有时间[①]。"也就是说海德格尔将时间看做是有终结的，是随着此在的死亡而消失的，这与一切物质的变化过程都具有时间性是矛盾的。特别是海德格尔在论述过程中始终将未来、现在、过去看做是时间性的到时方式，即看做是时间的内容而非物质的变化过程的表现形式，因此相应的观点是不可能正确的。虽然如此，海德格尔关于时间是时间性的到时的观点对时间的本质问题的解决还是有相当的启发意义。

3.3.2 时间的本质

通过上面对物质的变化过程以及时间的各种性质的广泛而深入的讨论以及通过对人类历史上一些最重要的思想家关于时间的本质问题的重要论述的考察，我们对时间的本质特征有了大致的轮廓，对时间本质的把握基本上应该是水到渠成的事。关于时间的本质的认识概括起来说，应该包含以下几方面的内容：其一，时间具有客观性、可感知性及可测量性，从而我们可以对它进行相对独立的思考及研究；其二，时间是不同于同时又隐含在(即内在于)物质的存在及变化过程中，因此与物质的存在及变化过程具有密不可分的联系；其三，时间不具有方向性及流动性，因此不可能有独立于物质的存在及变化过程的所谓时间河流存在，从而进一步说明时间不可能独立于物质的变化过程而存在；其四，时间的测量值(而非时间本身)具有相对性，从而时间本身不受所在参照系的运动状态或参照系所在环境中空间结构的影响，是物质的变化过程中"稳定"的因素，符合其物质变化过程的属性的特征。因此，在关于时间本质的定义中也必须综合考虑这些内容。但是，在讨论时间的本质之前我们要先明确什么是事物的本质。所谓事物的本质基本释义为本身的形体或本来的形体，指事物本身所固有的本质属性、存在的依据。而事物的本质属性则是该事物本身在任何条件下都具有的能够将该事物与其他事物区别开来的本质的规定性。显然，某一事物的本质属性与该事物之间在任何条件下都必定具有不可分割的内在联系，从而不可能脱离该事物而独立存在。例如，我们知道惯性质量与任何物质之间在各种条件下都具有不可分割的联系，是任何物质的属性：一方面，一切物质都具有惯性质量，没有惯性质量的物质是不存在的；另一方面，只有物质才具有惯性质量，惯性质量不可能独立于物质而存在，从而物质的惯性质量就是物质的本质属性。又如长度是 n 维空间中任何不同的两点之间短程线的属性：首先因为任何 n 维空间中的任何不同的两点之间的短程线都具有长度，而且长度本身不可能独立于线段而存在，是线段本身才具有的，这也就意味着 n 维空间中任何两点之间的短程线与长度之间具有不可分割的联系，从而长度是 n 维空间中任何

① 黄裕生. 时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M]. 南京：江苏人民出版社，2012：117.

两点之间的短程线的本质属性。又比如意识是人的本质属性，主要原因在于意识与人具有不可分割的联系，任何人都具有意识而且意识不能脱离人而独立存在，并且是人所具有的。下面我们将借助以上所进行的各种论述对时间的本质问题进行论述。

首先，我们知道任何物质完成其变化过程都需要时间，而我们能够想象到的任何一段时间间隔都只能是物质完成其变化过程所需要的时间而不可能是独立于物质的变化过程而流逝的时间，也就是说任何时间间隔都不可能脱离物质的变化过程，这一点我们在时间的性质的讨论中也进行过论证，从而时间与物质的变化过程之间具有密切关系；另外，因为任何物体的运动都是在空间中发生的，是物体从空间中的一点移动到空间中的另一点的空间位置的变化，而空间中任何两点之间的连线都具有长度从而是可以量化的，即可以归结为一个个数；我们还知道，物体完成从空间中的一点移动到空间中的另一点的这种空间位置的变化是不可能在瞬间完成的，即总是需要一定的时间。特别是由第 1 章的相关讨论可知，当物体的运动速度接近甚至达到光速或者物体处于黑洞中这些极端情况时，相应参照系中的时间也不会停止(此即所谓的时间的绝对性)，物体完成从空间中的一点移动到空间中的另一点的这种空间位置的变化同样不可能在瞬间完成的。而这样的时间总是与物体的空间位置的变化相对应，从而也可以说当物体的空间位置发生变化时与之相应的一段时间也就过去了。而我们同样知道，任何复杂的物质的变化过程都可以归结为物体的空间位置的变化，因此，除了空间位置的变化之外时间同样也是物质变化过程的内容，即在考虑物质的变化过程发生的同时必须考虑完成这一变化过程所需要的时间(即是说时间是物质的变化过程的最重要的内容)，唯有如此，对物质的变化过程的思考才是全面的、完整的，从而我们同样也可以用这段时间去衡量该物体的空间位置的变化，因此我们可以说时间是运动的计数。

其次，任何物质的存在及变化过程都具有时间性(在物理学中通常用时间间隔——两不同时刻的差值——表示)，没有时间性的物质的存在及变化过程根本不可能发生，从而也就不可能被我们的感官所感知，即时间性是物质的变化过程最基本的内容；同时，时间性是仅仅只有物质的存在及变化过程才具有的，从而不可能独立于物质的存在及变化过程而存在，因此不结合物质的变化过程而抽象地谈论反映其时间性的时间间隔没有任何意义。这里所说的时间性与海德格尔在其《存在与时间》中频繁使用的"时间性"概念，如"此在有死，即此在能觉悟或领会到死亡而把死亡作为可能性来生存，因而此在才有时间性"[①]中所说的时间性的含义与时间间隔的含义非常接近；而海德格尔用时间性所定义的时间则与物理学中经常使

① 黄裕生. 时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M]. 南京：江苏人民出版社，2012：112.

用的时刻的含义相对应，如“所谓的到时也就是到其时机，是……时候。时间性的到时，也就是时间性的展现或显现：展现为是……时机”[①]。由此可见，时间性与物质的存在及变化过程具有密不可分的联系，因此可以说时间性是物质的存在及变化过程的本质属性。另外，时间性也是时间（是所有不同的时刻构成的集合）的最本质的特性。由于时间包含有时刻及时间间隔两方面的内容，而从反映时间性的本质特征的时间间隔中完全可以引申出时刻的概念，因为如果我们将时间间隔看做是由点集构成的，并且借助时钟对该时间间隔的测量可以赋予时间间隔上任何一个点以相应的数值，那么与时间间隔上的每一个点所对应的数值就是上所谓的时刻。同时如果我们将一个标注了时刻的时间间隔的两个端点向其两边无限延长，就可以得到时间坐标轴，而在时间坐标轴上我们又可以很方便地获得任意两个时刻之间的时间间隔的值。也就是说时间性可以看做比时间更加基本的概念，是时间之为时间的最基本（不能再作进一步分析的）、最重要的内容。不借助时间性概念，任何关于时间的本质的定义都不可能实现，从而对时间概念的理解及解释也将是不可能的。这就是在海德格尔关于时间的本质的定义中将时间性看做是时间的最本质的内容，特别是将时间看做“时间性的到时”的根本原因。而且正如点、线、面等概念是几何中不能作进一步分析的最基本概念一样，时间性在科学以及哲学中同样也是不能够也不需要再作进一步分析的最基本的概念，这也就意味着我们必须而且只能借助时间性概念才能够对时间进行理解、解释，也就是说脱离物质的存在及变化过程从而脱离物质的存在及变化过程的时间性（或者忽略任意两个不同时刻的物质的状态差异）而谈论时间，所谓的时间将成为空洞的、没有任何意义的对象，对这样的对象我们将无法言说、无从谈论，这也正是由于存在主义哲学家海德格尔在其著作——《存在与时间》——虽然表面上看论述的内容应该是存在与时间之间的关系，但其主要内容涉及的却是此在（一种特殊的存在，即海德格尔所称的存在者或通俗地说是人）与时间性之间的关系，并借助时间性概念对时间的本质内容进行定义（如将时间定义为时间性的到时）的原因。这里需要特别指出的是，即使是亚里士多德关于时间本质的定义同样将时间性作为最基本的概念并借助这一概念实现的，正如德国哲学家克劳斯·黑尔德在其著作中对亚里士多德关于时间的本质的定义进行分析时所说：“在亚里士多德的定义中，时间应当理解为时间段（Zeitspanne），也就是说，它是对于‘从这儿到那儿的变化’（Veränderung-von-bis）来说的，即在位移的情况下：对于从起点到终点的运动不可或缺的那个‘多久’（Wie lange）。这个‘多久’是可以度量的。它具体发生在对两个运动的比较中。在某人乘飞机从法兰克福到纽约期间，他手表上的指针在表盘上作了七次

① 黄裕生．时间与永恒——论海德格尔哲学中的时间问题[M]．南京：江苏人民出版社，2012：111．

均匀圆周运动。因此，这个乘坐飞机的旅客可将这种圆周运动用作度量单位，在自己到达肯尼迪机场时确认：飞机的位移运动持续了这种每次皆相等的圆周运动的七倍之久[①]。"这里所说的时间段（即时间间隔）显然是与运动过程的时间性相对应，是时间性的具体表现形式，同时也是量化了的时间性。基于这里提到的关于时间本质的几方面的内容，特别是基于一切物质的存在及变化过程都具有时间性这一特征，并结合我们前面讨论过的时间的各种性质（例如时间的测量值而非时间本身的相对性、时间不具有方向性、时间不具有流动性以及时间的维度为零这几个重要性质）以及由此得出的相应结论，我们在此提出关于时间的本质的定义：**时间是一切物质的存在及变化过程的本质属性，是对物质的存在及变化过程的时间性（即非瞬间性）的度量或计数。**由此定义可知，我们并不需要一种外在（或独立）于物质的存在及变化过程的时间概念，物质的存在及变化过程就是一切，宇宙中并没有任何独立于物质的存在及变化过程的对象能够存在着。从而可以说时间之于物质的存在及变化过程等同于长度之于空间中任何不同的两点之间的短程线、惯性质量之于物体、意识之于人等关系，也即时间不能够脱离物质的存在与变化过程而独立存在，从而与物质的存在及变化过程之间具有密不可分的关系。我们这里关于时间的本质的定义与古希腊伟大的哲学家亚里士多德关于"时间是运动的数"、德国存在主义哲学家海德格尔关于"时间是时间性的到时"等时间本质的定义的内涵基本一致，也就是说我们这里关于时间的本质的定义与亚里士多德及海德格尔关于时间的本质的定义基本相同，同时，我们关于时间的本质的定义也与现代科学特别是现代物理学中时间的含义完全一致，而且，我们关于时间的本质的定义与我们在上面讨论过的时间的各种性质也是完全一致的，在此我们就不再作进一步的、深入的讨论了。

---

① [德]克劳斯·黑尔德.时间现象学的基本概念[M].靳希平，孙周兴，张灯，柯小刚，译.上海：上海译文出版社，2009：4.

第4章 关于时间旅行问题的讨论

除了我们上面详细讨论过的时间的各种性质及时间的本质等问题之外，所谓的时间旅行也是人们在谈论时间问题时经常要涉及的有趣的同时也是严肃的话题，实际上，时间旅行问题不但是科幻作家们永恒的题材，同样也是相对论物理学家正在进行深入研究的课题。虽然如此，但迄今为止现有的科学理论对于能否进行时间旅行并没有给出最终解决的答案，甚至对于由广义相对论的引力场方程所得到的所谓的时间旅行解的具体意义，物理学家们都有不同的解读。显然，能否进行时间旅行归根结底完全由时间的性质乃至时间的本质所决定，任何关于时间旅行问题的科学理论都必须以时间的各种性质以及时间的本质为依据。因此，我们认为关于能否进行时间旅行的问题必须由关于时间的理论来回答，并且每一个相对完善的时间理论都必须能够对时间旅行问题给出自己的明确解释。下面我们就结合前面详细论述过的时间的各种性质对时间旅行的问题进行讨论。

时间旅行也常常被称做时空旅行、时光旅行或时空穿越等，是指人或者其他事物从某一时间点出现在或跃变到另外一个时间点的事件。依照人类对时间的常识性观念，我们任何人都是随着时间的流逝自然而然地从刚出生时的婴儿开始长大成人并逐渐衰老直到死亡，也就是说时间就像一条永不停息的河流，任何人或任何事物都会在时间长河中随着时间的流逝而不断地从过去到现在再到未来。而当代物理学中正在广泛讨论的时间旅行则完全违反事物在时间长河中“随波逐流”的被动方式：就像在三维空间中我们可以自由地从空间中的一个位置移动到另外一个位置一样，在时间长河中我们同样可以做到要么瞬间到达未来某一时刻，要么突然回到过去某一年代，从而在时间长河中的任何时刻之间自由穿行、游刃有余，这显然是与时间的流逝方向（如时间的正向流逝或反向流逝）完全无关的事件，也就是说时间旅行必定不是在时间中进行的而完全是超越时间的旅行，从而时间旅行不可能是在“时间维度”上的简单“移动”。因为在“时间维度”上的移动必定会涉及移动速度的问题，这样就必须引进第二个时间维度，从而就会进入到关于时间旅行的恶性循环中。我们知道，因为地球的引力将我们人类限制在一个狭小的空间中，从而使我们人类失去了原则上可以在广阔宇宙的三维空间中任何位置上移动的自由，而实现太空飞行则是人类突破地球的引力限制从而真正实现在三维空间中自由移动的第一步，相信随着科学技术的发展，人类最终可以借助更先进的太空飞行

器实现星际空间旅行的伟大梦想。而如果时间旅行真的能够实现，那将是星际空间旅行黯然失色的最重大事件，同时必定将是人类实现完全、彻底自由的新纪元，但直到今天关于时间旅行的课题仍然停留在理论和想象阶段，而且还仅仅只是人类美好的梦想。

在这一被相对论物理学家认为是最激动人心的伟大时刻即将到来之前，众多的科幻作家们早已开始在大脑中进行时间旅行的模拟、想象、思考和筹划，比如H. G. 威尔斯(H. G. Wells)早在爱因斯坦提出狭义相对论之前就在其著名的科幻小说《时间机器》中描述人类借助时间机器进行时间旅行时所遇到的各种有趣事件的描述。他们在科幻小说中描述、思考着在思想中实现的时间旅行过程中可能会遇到的各种状况。如今，这样的作品真可谓是琳琅满目，以至于“穿越剧”已经成为一类时尚的剧目。除了科幻作家之外，一些哲学家及逻辑学家则把时间旅行的可能性当做非常严肃的课题进行研究、思索，随着对时间旅行的各种问题的深入研究，他们发现时间旅行会导致多种逻辑上甚至哲学上的悖论，特别是祖母悖论以及因果关系悖论则是其中最为著名的悖论。而我们下面的分析将使我们认识到时间旅行还必然会导致能量守恒定律等物理学中一系列最重要的定律的失效，相关悖论的出现以及守恒定律的失效足以影响人们对时间旅行的可能性的重新认识。由于极度地颠覆人类的常识甚至科学原理，时间旅行一直以来都只是科幻小说或科幻影视剧的题材。但随着人类对自然界认识的日渐成熟，特别是随着对广义相对论及量子力学研究的深入，物理学家则全然不顾时间旅行概念所带来的逻辑上的悖论，认为宇宙中或许存在可以规避真实的时间旅行过程中产生的时间旅行者悖论的法则，从而可以帮助人类最终实现时间旅行的梦想，并且认为科学已经能够解答时间旅行的可能性，可以为时间旅行的实现提供真正适用的机器。因为有科学理论提供强有力的“支持”，一些发明家沿着科学家在科学研究中找到的线索开始着手时间机器——能够帮助人类实现时间旅行的工具——的发明。但由于人类对时间的本质的理解至今仍然非常混乱，而时间的本质问题又将是决定时间旅行是否有意义以及是否可行的关键，在完全没有搞清时间的本质及意义的情况下，科学家通过对广义相对论及量子力学的研究所获得的关于时间旅行的可行性的结论靠得住吗？我们通过前面的讨论所得到的关于时间的各种性质真的允许我们进行时间旅行吗？关于时间旅行的诸多悖论对物理学理论而言意味着什么，并且真的不值得关注吗？物理学家们通过科学研究得到的关于时间旅行的方案真的可行吗？任何关于时间的理论都必须回答这些问题，否则，相关的理论就不是系统的、完整的。下面我们就结合前面关于时间及其本质的结论对这些问题进行讨论、分析。

4.1 所谓的时间旅行所导致的各种悖论以及解决方案

在逻辑学或数学教材中对悖论通常是这样定义的：存在这样一类命题 P，由命题 P 出发可以导出与之存在逻辑关联的命题 Q，如果假定 Q 真，就可推导出 Q 假。而如果假定 Q 假，则又可推导出 Q 真，从而在相关的知识范围内无法判断命题 Q 到底是真命题还是假命题，也就是说命题 Q 亦真亦假，这种情况下我们就说命题 P 是包含悖论的命题。最早被提出并且至今仍然被哲学及科学界广泛讨论及思考的悖论有古希腊哲学家伊壁门尼德斯(约公元前 6 世纪)提出的"说谎者悖论"以及古希腊哲学家芝诺提出的四个著名的悖论，而在近代及现代数学理论中人们也发现了对数学发展产生深远影响的悖论，如数学家康托尔的提出的"最大基数悖论"、布拉里·福蒂提出的"最大序数悖论"、罗素提出的"理发师悖论"等等。可以说在人类所建构的任何相对完备的逻辑体系中都可以产生出悖论，而且悖论是理论体系不够完备，仍需进一步发展及完善的标志。值得特别关注的是，物理学家在物理学理论体系中同样发现了悖论，其中有"双生子悖论"、"外祖母悖论"、"无作者的作品悖论"，当然还包括古希腊哲学家芝诺提出的"阿基里斯悖论"及"飞矢不动悖论"。而"外祖母悖论"及"无作者的作品悖论"等悖论则是科学家在思想中模拟进行所谓的时间旅行过程中导致的悖论，模拟的时间旅行除了能够产生这些悖论之外，还会导致许多不可思议甚至不可能的事情发生，而我们通常看做是奇迹的事件，在模拟的时间旅行看来则完全是再"正常"不过的事情，下面我们就对时间旅行悖论进行简单的讨论。

在我们开始讨论关于时间旅行所能导致的悖论之前，我们暂且不对时间旅行所造成的时序上的混乱加以讨论；另外我们假定时间旅行的前提条件是满足的，即过去以及未来的任一时刻的宇宙与我们现在的宇宙一样是真实存在的，为我们随时可以进行的时间旅行提供了完备的场所。我们人类的经验常识告诉我们，过去的因为永远成为过去从而无法改变，而未来的因为还未到来从而还无法预料，而如果时间旅行是可能的，这一常识性的认识将被彻底颠覆，时间旅行将能够使已经成为历史的事实轻易更改，而对将来还未到来的、无法预料的事件，通过时间旅行到达过去就可清晰地了解到其详情，如果有需要人们还可以对其进行随意的干预。由时间旅行的思想实验可以引申出许多悖论，其中最为著名的悖论被称做"外祖母悖论"，其内容是：我们将某一时间旅行者称做 A，如果 A 回到 A 的母亲还未出生的过去年代并且在 A 的外祖母怀 A 的母亲之前就杀死了 A 的外祖母，那么这个跨时间的旅行者 A 会不会在其外祖母被 A 杀死的瞬间立刻消失呢？这里存在明显的矛盾，显然，如果没有 A 的外祖母就不可能有 A 的母亲，而没有 A 的母亲也就不可能有 A，而没有了 A，A 怎么能返回到 A 的外祖母怀 A 的母亲之前杀死 A

的外祖母呢？也就是说时间旅行者A回到A的外祖母怀A的母亲之前杀死A的外祖母会即可导致A既存在又不存在的两难处境，也就是通常所说的逻辑悖论。除此之外，我们可以将外祖母悖论中的“外祖母”置换为外祖母的外祖母，以及还可以将这一血缘关系链条倒推至几亿年前最原始的单细胞生物刚出现时的那一个地球上所有生物的共同祖先——原母细胞，原则上甚至还可以将A的外祖母置换为宇宙大爆炸刚开始的那一瞬间空间中所存在的即将产生大爆炸的那个奇点，这样A甚至可以阻止宇宙大爆炸的发生，从而阻止当今宇宙万物的出现，进而阻止A自己的出现，这一切看起来是极其荒谬、不值一驳的。另外，外祖母悖论其实在某种意义上也可称做因果悖论，对A而言A的母亲可以称做A的原因，而A则可以称做A的母亲的结果。因为有了A的母亲才有了A；A在A的外祖母怀A的母亲之前杀死A的外祖母这一事件导致了A的母亲这一原因无法出现，但在没有了A的原因的情况下却出现了A这一结果去作用于原因，这显然违反了因果关系，同时也违反了事物存在的原则。其实将外祖母悖论稍作改动即可成为因果悖论。我们知道，强烈的太阳磁暴会导致地球上电网的全面瘫痪，假如在2201年7月10日一次强烈的磁暴已经导致了地球上所有电网的全面大瘫痪，而未来地球上人类的科学技术已经高度发达，以至于可以阻止太阳磁暴对地球上电网的影响，那个时代的人类派一组人员携带先进的设备从未来经过时间旅行来到2201年7月9日并采取措施将设备安装至合适的地点，当2201年7月10日到来时由于设备的作用使得太阳磁暴对地球上电网的影响消除了。那么，已经瘫痪的电网会即刻恢复正常，就像什么都没有发生过一样吗？也就是说在结果已经出现的情况下未来的人类采用先进的科学技术将导致结果出现的原因消除了，那么已经出现的结果会因此自动消失吗？这里显然出现了严重的逻辑混乱，特别是出现了因果悖论。

此外，时间旅行还会导致自我意识悖论。如假定某一时间旅行者A回到自己少年时期所生活的地方并遇见少年时期的自己，那么A与少年时期的A具有同一个自我意识吗？因为A与少年时期的A应该是同一个人，那么这种情况下“两者”显然应该共有同一个自我意识，但A作为时间旅行者遇见少年时期的A这一件事本身就说明“两者”是两个不同的个体，而两个不同的个体自然不会共有同一个自我意识，因为自我意识与意识主体（个体）的感觉是密不可分的，而自我意识是意识主体的自我感知，这就意味着自我意识不可能脱离意识主体而存在，而如果“两者”不具有共同的自我意识，那么就不可能是同一个人，从而必定具有不同的自我意识，这样“两者”就不可能是同一个人，那么时间旅行者A所遇见到的就不可能是少年时期的A。另外，如果A遇见少年时期的A时“两者”共有同一个自我意识，那么同一个自我意识就会共同占据在空间上明显分立的不同的个体，而这与自我意识的独立的个体性显然是矛盾的。也就是说这里总是存在明显的矛盾。显然，

我们还可以列举许多其他的关于时间旅行导致的悖论，甚至可以引申出完全违背人类伦理的悖论，这些悖论可以粗略地归结为以下几类：①存在性悖论。由于某一事物存在的前提条件被该事物自身所毁灭或否定，从而使得该事物是否还能继续存在已经完全无法确定。外祖母悖论以及无作者的作品悖论等即是这样的悖论。②因果关系悖论，相应的悖论最终导致因果关系的混乱。③自我意识悖论。相应的悖论导致自我意识个体的混乱。当然，在时间旅行中这些悖论都是完全混杂在一起的，从不同的角度进行解释就可以得到不同类型的悖论。在此我们就不再一一列举了。

时间旅行除了会产生上述众多的悖论之外，还必然导致无数不可思议的结论。如果在现实中时间旅行是允许的，那么现实的时间旅行将可以使得旅行者能够借助到过去或者未来旅行的方式获取过去或未来的宇宙中所有信息，由于时间旅行者可以亲自到达过去或未来想要去之处，因此使得对旅行者而言过去或未来宇宙中的一切都是可以用其感官感受到从而对其是完全确定的，这样就使旅行者能够做到对未来的分毫不差地预言，以对其下一步行动作出最正确判断，从而可以因此成为伟人、圣人。现实的时间旅行还可以使旅行者获得过去或未来的宇宙中所需要的任何资源，从而能够解决人类社会存在的任何问题，包括能源危机及环境问题等都将随着时间旅行的实现迎刃而解，可以为人类创造无限的生存条件。现实的时间旅行更可以使人类与过去或未来的宇宙中所有事物发生相互作用，因此可以对人类历史进行随意的修改，从而也就没有任何历史可言，而未来所有的一切也都可以按旅行者的意愿展现，也就没有未来可言，更确切地说可以使时间旅行者成为决定世界演化方向的导演，使其可以对任何不满意的变化过程当做剧本一样随意地加以编撰、剪辑。总之，现实的时间旅行可以使参与旅行的人获得无限的自由、能力；任何人无需经过努力都可以成功，同样的，任何人所有的努力也可以在瞬间化为乌有。因此时间旅行可以为人类带来无限的烦恼、产生无限的问题（甚至包括人类的存在、宇宙的存在都会成为问题）、造成无限的混乱。当然，将所有这些结论联系在一起仍然可以构成一个个悖论，也就是说时间旅行实际上就是悖论性的旅行。

允许时间旅行除了会产生上述众多的悖论之外，还必然违反自然界中最普遍的定律如能量守恒定律、动量守恒定律等，而这是以往许多专注于时间旅行研究的学者完全没有注意到，更没有考虑过的问题。我们知道，一般情况下任何物理量都会随着时间的“流逝”而发生变化，而如果某一物理量在任一时刻都不发生变化，那么我们就说该物理参数是恒定的，也就是说任何物理量是否恒定必须而且只能通过将该物理量在每一时刻的量值相比较才能下结论，从而宇宙的总能量是否守恒也只能通过这种方式加以确定。因此能量守恒就意味着整个宇宙作为一个整体其

总能量在任意时刻都是恒定的，即宇宙的总能量在任一时刻都保持恒定，不发生改变，能量守恒定律的这一表述方式与通常我们在教科书中接触到的热力学第一定律的表述完全一致。假如在某一时刻 t_0 一个旅行者到过去或未来的某一时刻 t_1 进行时间旅行，则根据狭义相对论的质能等价关系，由于构成时间旅行者的身体的物质以及时间旅行者使用的时间机器等都具有质量，从而这部分质量 m 也是具有能量 e 的，同时由于这部分质量或能量也是整个宇宙在旅行者刚要进行时间旅行这一时刻 t_0 宇宙中所有物质的质量或能量的组成部分，那么在进行时间旅行这一时刻 t_0 由于旅行者已经到过去或未来的时刻 t_1，则在时刻 t_0 宇宙的总质量 M_0 或总能量 E_0 已经缺少了一部分，即分别成为 M_0-m 及 E_0-e，从而在时刻 t_0 宇宙的总质量或总能量已经发生了变化，即不等于之前的确定值；另外，由于时间旅行者到了时刻 t_1 的宇宙，从而在时刻 t_1 宇宙的总质量 M_1 或总能量 E_1 也发生了变化。也就是说在时刻 t_0 及 t_1 宇宙的总质量或总能量均已发生了变化，分别变为 M_1+m 及 E_1+e，从而能量守恒定律在这两个时刻受到了完全的破坏。其实类似的推理同样可以用于说明时间旅行会导致动量守恒、角动量守恒甚至重子数守恒等一系列物理学中的守恒定律的失效。其次，如果考虑时间旅行者到达过去或未来的某一时刻并与事物之间发生相互作用，或者从过去或未来不断携带能源到现在的时刻，同样也能导致过去或未来某一时刻宇宙中的能量或动量等物理量发生变化从而导致这些物理量的不守恒，而地球上永远不可能有能源枯竭的那一天，从而我们也不需要为能源问题发生战争了。不仅如此，如果时间旅行能够实施，那么在当前的世界发生能源枯竭的情况下就可以派时间旅行者回到过去的世界带回源源不断的能源，那么世界的能源将取之不竭、用之不尽，能源危机永远不可能发生，从而必然导致热力学第二定律的失效甚至导致永动机的出现，而这些都是所有物理理论所不允许的。特别是热力学第二定律被物理学家们称之为是宇宙间最具普遍性的定律、最至高无上的自然法则，如果某一物理理论与热力学第二定律相矛盾，那么这一理论无论如何完美，都将不可能是正确的，正如英国物理学家彼得·柯文尼和罗杰·海菲尔德在他们的著作中所叙述的："如果科学家们认定达尔文和热力学之间确有无法沟通的分歧，则大多数物理学家一定会说是达尔文错了，因为第二定律已经被证明是普遍适用的。用爱丁顿的话来说，'我认为，熵增原则——即热力学第二定律——是自然界所有定律中至高无上的。如果有人指出你所钟爱的宇宙理论与麦克斯韦方程不符——那么就算麦克斯韦方程倒霉。如果发现它与观测相矛盾——那一定是观测人把事情搞糟了。但是如果发现你的理论违背了热力学第二定律，我就敢说你没有指望了，你的理论只有丢尽脸、垮台'[①]。"由此可见，如果某

① [英]彼得·柯文尼，[英]罗杰·海菲尔德. 时间之箭[M]. 江涛，向守平，译. 长沙：湖南科学技术出版社，1995：150.

一物理理论能够导致允许进行时间旅行的解，那么这一理论必定与热力学第二定律之间存在间接矛盾，从而该理论也必定存在严重问题。

显然，在模拟的时间旅行中之所以会出现这些悖论，根本原因在于允许时间旅行者在回到过去或未来的时间旅行中直接与过去或未来的世界中的事物发生物质、能量及信息的交换。为消除外祖母悖论，许多学者都提出了自己的解决方案。其中英国物理学家霍金指出，如果对时间旅行者进行某种限制，比如不允许旅行者在时间旅行过程中时对过去或未来的世界进行干预，也就是说旅行者只允许“观看”，不允许“触碰”，如果进行这样的限制后外祖母悖论就可以消除，所有相关的悖论也就不可能存在了。这就是英国物理学家霍金先生提出的用于保护历史的著名的“时序保护猜想”：“假如谁想卷曲时空回到过去，真空极化效应将使能量动量张量的期望值变得很大。把这样的能量动量张量放回爱因斯坦方程，结果似乎不会产生时间机器。看来，存在某个时序的保护者，在阻止闭合类时曲线的出现，从而为历史学家创造一个安全的世界①。”但霍金无法对其“时序保护猜想”提出更深层次的理论依据，只是将其当做一条强制性的规定，实在无法令人信服。而美国麻省理工学院的希斯·罗埃德教授在研究时间旅行导致的外祖母悖论过程中提出了所谓的“后选择模型”的时间旅行模式。希斯·罗埃德教授认为在这个模式中，所有矛盾事件及悖论都会被禁止。它允许人们回到过去的时间，但严禁一切可能在未来导致悖论产生的行为。确切地说，该种时间旅行模式避开了传统理论中时间旅行者的旅行最后发展成与其自身的存在发生矛盾的情况。在提出其时间旅行模式后，希斯·罗埃德教授又企图借助实验证明其旅行模式的可行性，实验结果虽然距离真正实现时间旅行还遥不可及，却仍然得到了一些令人鼓舞的结果，坚定了人们对时间旅行可行性的信念，但也不能因此过于乐观，因为时间旅行终究只是人类的梦想，是人类对生命永恒性的一种美好愿望。此外，还有学者提出用平行宇宙的模型来消除外祖母悖论，借助这一模型，外祖母悖论就可以得到合理的解释：时间旅行者 A 可以回到过去 A 的外祖母还未怀上 A 的母亲前杀死 A 的外祖母，但这将导致世界发生分裂而进入两个不同的宇宙，其中一个宇宙中有 A，而另一个宇宙中没有 A。根据“平行宇宙”理论，每当记录下一个观测结果或者作出一个哪怕是很小的一个决定时，世界就会出现一个分裂。而世界更深层次的分裂则发生在微观粒子层次，比如即使是任何原子的量子态的跃迁或者电子通过双狭缝后到达屏上后在屏上留下光点等事件都会导致不同的可能性发生，而所有不同的可能性的发生都会导致世界的分裂。无论如何，学者们当前都只是将注意力集中在解决时间旅行中的外祖母悖论上，根本还没有考虑到时间旅行所导致的对具有最普遍意义

① [英]史蒂芬·霍金，等.果壳里的60年[M].李泳，译.长沙：湖南科学技术出版社，2011：10.

的能量守恒定律等的破坏。或许，关于时间旅行的悖论问题可以通过引入一些限制条件加以解决，但能量守恒定律等众多的守恒定律则是时间旅行中无法回避的。实际上只要现实的时间旅行是不被禁止的，那么包括能量守恒定律在内的物理量的守恒定律以及热力学第二定律进而整个物理学体系都必将失效（从而宇宙的所有秩序都将彻底趋于混乱），而且采取任何形式的时间旅行模式及方法都无法挽救这些守恒定律。在微观现象中守恒定律短暂的失效似乎是允许的，可能不会给问题带来太大的麻烦，但在宏观层次能量守恒定律等则是物理学中经受住了各种严格的实验检验的规律，如此重要的定律一旦被宣布失效，那么物理学中乃至一切科学中的规律性的内容还能靠得住吗？可见，这才是最为严重、最具挑战性的问题。

4.2 所谓的实现时间旅行的前提条件及理论依据

时间旅行实际上是人们对时间的空间化的结果。人类可以在时间中自由旅行的前提条件是所有过去（或未来）的事物并没有在宇宙中消亡（或还未存在），而是真实地存在着，存在于过去（或未来）我们通常认为刚刚消失（或正要出现）的那一时刻，从而我们必须假设时间在质上是与空间完全一样的对象，唯一的不同之处是时间的维度是一维的而空间的维度是三维的，这也就意味着宇宙中的一切事物就像可以在三维空间中的任意位置上存在那样也可以在一维时间的任一时刻上存在，或者更确切地说任何事物都在任意时刻的相应的空间位置上像电影胶片上每一帧图片那样存在着，而光怪陆离、变化万千的世界就像电影一样播放着一切都拍摄到胶片上的各种固定的情节，当然，这仅仅是一种比喻，真实的世界应该比这复杂得多；同时这也是一种世界观，它从一个全新的视角提出宇宙中的一切事物是如何存在的，这些事物的变化到底是怎么回事以及如何实现的。这就是所谓的无时态宇宙模型，通常被称做时间的无时态理论，而与之相反的我们通常使用的对物质变化过程的描述方式可以被称做时间的时态理论。关于时间的无时态理论的主要思想，正如英国哲学家克怀格·卡伦德和拉尔夫·埃德尼在其著作中所说："这个理论的主要思想是：没有变化、没有分支、没有历程，以我们表示空间的方式表示时间，这挺合适。正如纽约、伦敦、莫斯科都存在，却在不同的地点，所以'过去''现在'和'未来'都存在却不在同一时刻[①]。并且在这个理论中我们不应该宣称'过去'和'未来'现在就存在着。根据这个理论，'现在'没有特别的位置。'现在'仅仅是你说出词语'现在'的那一刻[②]。"在时间的无时态理论中是用时间—空间坐标系上的一个个代表某一个人一生在任一时刻所处的空间位置的坐标点所联成的曲线

① [英]克怀格·卡伦德，[英]拉尔夫·埃德尼. 视读时间[M]. 张颖，译. 合肥：安徽文艺出版社，2007：35.
② [英]克怀格·卡伦德，[英]拉尔夫·埃德尼. 视读时间[M]. 张颖，译. 合肥：安徽文艺出版社，2007：40.

来描述这个人一生的经历，甚至一个国家的历史也可以借助类似的方法进行描述，这实际上是一种世界观，这种观念来自于爱因斯坦的狭义及广义相对论中对所谓的四维时空中发生的事件的描述的启发，是对爱因斯坦的四维时空的哲学化。在这一理论中对物质变化过程的描述与通常物理学中的描述方式完全不同，通常物理学中所说的物质的变化是指变化过程中前一时刻状态的消失以及后一时刻状态的出现，说明后一时刻的状态完全是由前一时刻的状态演变而来的，即永远是后一时刻的状态替换（或继承）了前一时刻的状态成为在任何意义上都唯一存在的状态，它们之间的关系是“前赴后继”的关系。而无时态理论则认为，如果使用时间—空间坐标系中的一个个坐标点来描述物质的变化过程中的每一个状态，那么由于这些坐标点所连成的曲线是完全静态的，因此在坐标上物质变化过程从一个时刻到下一个时刻的状态不是替代而是完全平等的关系，甚至时间的每一时刻也是如此，也就是说坐标系上代表状态的每一个点都永远静态地存在着。这样，从通常物理学表述物质变化过程的方式的视角看这里并没有变化发生，所有的一切都是静止不动的，而所谓的物质的变化只是我们看问题的视角造成的。显然，时间的无时态理论对宇宙中物质变化过程的描述与当今流行的自然科学中通用的对物质的变化过程的描述方式完全不同，也与我们凭各种经验所形成的对物质的变化过程的本质的认识格格不入，而时间的时态理论对于描述我们的感觉所感知到的物质的变化过程而言仍然是最自然、最理想的方法。但对于描述时间旅行这一超越我们的经验范畴的现象而言，时间的时态理论则显得无能为力，而时间的无时态理论则成为用于描述适合于进行时间旅行的宇宙较为适合的模型。

另外，由于时间旅行是超越时间、完全不在时间中进行的旅行，因此，仅仅只是假定时间的维度是一维的还不够，如果要实现真正的时间旅行，我们宇宙的空间—时间还必须具备能够确保时间旅行者从时间维度上的一点跃迁而不是移动到另一点的性质。也就是说如果我们要到过去旅行并不需要时间处于倒流状态，即到过去旅行并不意味逆向的时间流带着我们到达我们所想要去的时刻或者时间旅行者需要以逆着时间流逝的方向而上的方式达到过去的时刻。超越时间、不在时间中进行的时间旅行可以使时间旅行者从现在瞬间跃迁到过去或未来的任何时刻（或者从时间维度上的任何一个时刻跃迁到任何其他时刻）而不需要花费任何时间，这才是真正的时间旅行，这与物理学中谈论的时间旅行显然不同。下面我们就现代物理学中经常谈论的时间旅行的一些方法进行简单介绍，我们暂且假定讨论中上述几个方面的条件都可以得到满足，从而真正意义上的时间旅行在理论上能够实现。

虽然模拟的时间旅行导致了无数从本质上而言无法解决的悖论，但一些理论物理学家却全然不顾时间旅行悖论的警示，义无返顾地投入似乎能够使人类文明

产生质的飞跃的时间旅行的伟大革命的梦想实践中。那么在物理学上如何实现时间的旅行呢？对于实现时间旅行的梦想的研究是科学家从狭义相对论中非常有名的孪生子悖论的研究开始的。

所谓孪生子悖论，即假定有一对刚出生(两者的岁数都是0岁)的孪生兄弟A与B，假定A一直留在地球上，而B则乘坐火箭飞离地球并且在宇宙空间中以V=0.999C的极高速度作星际旅行。由于B相对于A作高速运动，因此相对于地球上的A而言，B体内的新陈代谢活动就如火箭内的所有变化过程一样都按一定的比例协同变慢了。如果用生物钟的频率来表征各种生物体内新陈代谢的快慢，经计算相对于A而言，B体内生物钟的频率是A体内生物钟的频率的0.045倍，即A体内的生物钟振荡200次则B体内的生物钟振荡的次数只有9次，从而孪B体内生物钟的频率较A的慢21.2倍，这样B的寿命比A的寿命要长21.2倍，即相对于A而言，B所经历的3年时间就相当于A所经历的66.6年，也就是说相对于A而言地球上经过将近67年的时间后B返回地球，这时B的年龄只有3岁，而A的年龄已经将近67岁了；由于运动的相对性，那么地球相对于火箭的运动速度同样为V=0.999C，即地球同样以极高的速度相对于火箭运动，从而相对于火箭上的孪生兄弟B而言，地球上的孪生兄弟A体内的生物钟的频率变慢了，根据相同的计算可以得到与以上结论完全相反的结论，即经历对B而言66.6年的旅行后返回地球，这时B的年龄将近67岁，而相对于对B而言地球上仅仅只经历了3年的时间，从而A的年龄是3岁。由于A与B之间的相对运动，A与B之间具有对称性，因此孪生兄弟A或B的年龄在狭义相对论中是无法确定的，这就是所谓的孪生子悖论。而在广义相对论看来，A与B之间不存在对称性，即孪生兄弟B乘坐的火箭最终要达到很高的运动速度必须经过加速阶段，而B经过几年的星际旅行最终要返回地球必须又要经过减速阶段，并且B乘坐的火箭从地球出发最终又要返回地球必须要改变运动的方向，这也就是说B乘坐的火箭而不是A所在的地球相对于整个宇宙的星球而言在作加速运动，因此，最终结果只能是B显得更年轻而A的年龄更大，也就是说这里并不存在所谓的孪生子悖论。其实这里介绍的现象正是我们在第1章讨论过的相对运动导致物质完成其变化过程需要的时间具有相对性这一现象的体现。显然由于B经过几年的星际旅行其实际岁数要比A年轻许多，即B只有3岁时A已经是将近67岁的人，从而也可以说B经过几年的星际旅行到达了A的未来，这种情况也可以看做时间旅行的一种方式，但并非严格意义上的时间旅行，特别是这种时间旅行只能向未来而无法向过去进行。实际上我们还可以采用将一个人的身体冷冻的方式达到与上述过程完全等效的结果，理论上我们可以通过将B冷冻起来暂时使其体内的一切新陈代谢包括生物钟处于接近停止状态，而孪生子A则处于正常的生活状态，这样经过几年甚至几十

年后再将B解冻,由于B的生物钟一直处于几乎停止的状态,因此其刚被解冻时的实际年龄与刚刚进行冷冻时的实际年龄相差无几,从而B的年龄较A的年龄小很多。这里介绍的两种方法实际上都是通过将孪生子B的生物钟的频率降至很低,从而使人的衰老得到了延缓的方式达到延长B的寿命而实现所谓的时间旅行的,完全是在时间坐标轴上按时间的自然流逝进行的时间旅行,与我们上面关于真正的时间旅行(如通过某种方式直接到达未来的某一时刻)的概念有明显的不同,并且通过星际旅行的方式实现时间旅行需要我们乘坐的火箭以远远超出我们想象的速度运动,具体地说这一速度至少应该与光速具有可比性才能具有明显的效果,而要达到这种速度需要消耗超常的能量,因此人类以这种方式进行时间旅行至少目前看来是无法实现的。不过在宇宙空间中高速运动的微观粒子每时每刻都在作这种方式的时间旅行,而且精确的科学实验已经证明这样一种时间旅行的可行性。那么,这里所说的孪生子B向A的未来的时间旅行完成后是否永远留在了未来?即B到达A的未来后能否再返回到B进行时间旅行前的时刻或者到达过去的任一时刻?由于从未来返回意味着向与时间流逝的方向相反的方向进行时间旅行,从而上述问题就成为到过去的时间旅行是否可行的问题,而这才是物理学家们真正感兴趣的问题。由于在狭义相对论中要使得时间流逝的方向发生逆转就必须进行超光速运动,而超光速运动显然是被狭义相对论所禁止的,因此狭义相对论中到过去的时间旅行是被禁止的。而科学上首先提出所谓到过去的时间旅行的可能性的理论研究开始于广义相对论,这一点正如物理学家霍金在其作品中所描述的:"爱因斯坦的广义相对论是所有现代有关时间旅行讨论的基础。正如我们在早先章节中讲到的,爱因斯坦方程描述宇宙中的物质和能量如何将空间—时间弯曲和变形,从而使空间—时间变成动力量。在广义相对论中某人由其手表测量的私人时间总是增加,这正像在牛顿理论或者狭义相对论的平坦时空中一样。但是现在有了可能性:时空能够弯曲得这么厉害,使你在乘坐航天飞船出发之前即已返回[①]。"关于时间旅行的可能性,法国物理学家约翰·皮尔·卢米涅在其著作中也有过精彩的论述:"返回过去的旅行违反了要求原因总是在效果之前的因果律(见'光使时空联姻'一节),但是,因果律是一条由逻辑,而不是由相对论指定的规则,它在狭义相对论里无可置疑,而那里没有引力。现在,以超光速运动退回过去也同样绝对不允许。但是在广义相对论里,宇宙被引力所弯曲,时空几何被变形(例如,由于一个转动黑洞),因而使得不必作超光速运动就能去探索过去。如果回到过去是可能的,常识不就全崩溃了吗?并非如此。如果我们把因果律代之以自洽律,即

① [英]史蒂芬·霍金.果壳中的宇宙[M].吴忠超,译.长沙:湖南科学技术出版社,2012:135.

规定一个物理系统的演化必须自相一致，那么回到过去也是允许的[①]。”也就是说相对论物理学家的观念是，正是由于广义相对论揭示的所谓时空的弯曲才造成了反因果性扭曲从而使得真正意义上的时间旅行成为可能。

我们知道，广义相对论是建立在弯曲的四维黎曼时—空基础上的，其最重要的一个结论是物体的质量和能量能够导致物体所在之处及其周围四维时空的弯曲变形，而且物体的质量越大其周围四维时空的弯曲程度越大，而这也就意味着时间也成为弯曲的。特别是当物体的质量足够大时其周围的四维时空中的时间的方向会发生改变，从而正向（从过去向未来的方向）流逝的时间会变成反向（从未来向过去的方向）流逝的时间，向过去的时间旅行就成为可能。这一点是物理学家赫尔曼·外尔在研究广义相对论是最先认识到的，以下赫尔曼·外尔的观点引自保罗·戴维斯的著作：“赫尔曼·外尔注意到在一个万有引力特殊分布的时空中，一个人的世界线——即他或她在时空中的路线——会环绕回去并与自身相交。外尔认为尽管局部上粒子可能永远不能超过光速运动，但整体上，其未来可以与其过去连接起来。这种可能性的产生是因为引力场即意味着时空乃是弯曲的，并且其曲度足够大，足以延伸到把时空与自身奇异的连接起来[②]。”当然，除了巨大物体的质量及能量能够使其周围的四维时空发生弯曲，广义相对论的计算指出，物体的旋转也能够使旋转物体周围的四维时空产生弯曲，1949 年著名逻辑学家库尔特·哥德尔（Kurt Godel，1906—1978）通过对广义相对论的研究提出了爱因斯坦的引力场方程的旋转宇宙解，正如英国哲学家克怀格·卡伦德及拉尔夫·埃德尼在其著作中所叙述的，在哥德尔的旋转宇宙的模型中宇宙“没有一个独一无二的中心，从任何观察者的角度看，宇宙中的所有事物都在旋转”[③]。并且宇宙中的所有事物旋转的结果是宇宙中所有事物周围的“时空产生了扭曲以至于一些事件的特定未来可能会‘翻倒’”[④]。在哥德尔的旋转宇宙中时空发生了极度的弯曲以至于经过一段时间的旅行后时间流逝的方向会与旅行刚刚开始时时间流逝的方向相反，从而“只通过在旅行者局部未来里旅行而回到他的过去”[⑤]。“而随着四维时空发生弯曲，时间也会发生弯曲，显然在时间旅行过程中存在这样一个点，这一点是正向流逝的时间与反向流逝的时间的分界点，你可以利用这点作为向“下”回到过去的方式，而且可以在开始旅行之前回归到时空的某一点[⑥]。”在哥德尔的时空理论中有一处令人惊奇的地方，那就是时空里的每一个点都有物理上可行的路径来允许我们进行时

---

① [美]约翰·皮尔·卢米涅. 黑洞[M]. 卢炬甫，译. 长沙：湖南科学技术出版社，1997：164.
② [英]保罗·戴维斯. 关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M]. 崔存明，译. 长春：吉林人民出版社，2002：329.
③ [英]克怀格·卡伦德，[英]拉尔夫·埃德尼. 视读时间[M]. 张颖，译. 合肥：安徽文艺出版社，2007：99.
④ [英]克怀格·卡伦德，[英]拉尔夫·埃德尼. 视读时间[M]. 张颖，译. 合肥：安徽文艺出版社，2007：101.
⑤ [英]克怀格·卡伦德，[英]拉尔夫·埃德尼. 视读时间[M]. 张颖，译. 合肥：安徽文艺出版社，2007：103.
⑥ [英]克怀格·卡伦德，[英]拉尔夫·埃德尼. 视读时间[M]. 张颖，译. 合肥：安徽文艺出版社，2007：103.

间旅行。而且我们可以自一个事件到达另一个事件。正如哥德尔 1949 年所说的：通过火箭、宇宙飞船作环形旅行，在这些天体中你可以到过去、现在和未来的任何领域里旅行，并且还可以回来，在其他的天体里，造访遥远的空间区域同样是可能的，正如英国哲学家克怀格·卡伦德及拉尔夫·埃德尼在其著作中所叙述的："此外，你不需要跨越世界历史的整个过程，就可以回到过去。你首先仅仅需要走一点'绕道'，然后你就可以到达任何地方了(你在过去或未来里走得越远，这个绕道就越大)[①]。"虽然如此，但即使是哥德尔的旋转宇宙在理论上允许生存于该宇宙中的智慧生物进行时间旅行，想要在技术上实现这种旅行也绝非易事，如科学家大卫·马拉蒙特(David Malament，1947—)所做的理论计算表明要在技术上实现在哥德尔宇宙中的时间旅行所需要消耗的能量是难以想象的，也就是说即使是哥德尔的旋转宇宙中的时间旅行是可行的，但要在技术上实现相应的时间旅行则非常困难以致几乎不可能。显然，哥德尔的旋转宇宙完全是借助广义相对论构造出来的模型，这种模型只能存在于我们的想象中，而真实的宇宙的运行方式远远超出我们的想象，因此哥德尔的旋转宇宙与真实存在的宇宙有本质的区别，特别是旋转宇宙中时间的特性与真实存在的宇宙的时间的特性存在巨大差异，但哥德尔的宇宙仍然是广义相对论所允许的宇宙，正如英国物理学家保罗·戴维斯在其著作中所说，该理论："足以证明不存在着相对论的内在因素来禁止物质粒子，或者原则上禁止一个到达过去——并返回未来。哥德尔本人对自己的解说明如下：'乘坐宇宙飞船，在足够长的路线中进行一次还程旅行，有可能……旅行到过去、现在和未来的任何处所，并再次返回'[②]。"

自哥德尔提出允许进行时间旅行的旋转宇宙模型以后，许多物理学家据此认为广义相对论应该允许实施时间旅行，并且借助广义相对论对我们真实宇宙的时间旅行在技术上的可行性进行深入研究并提出多种关于如何实现时间旅行的理论及方法。其中较有影响力的有新西兰数学家罗伊·克尔(Roy Kerr)提出的关于时间旅行的理论，这一理论源于引力场方程的旋转黑洞解。对引力场方程进行研究最早获得的关于黑洞的解是施瓦西解，但施瓦西黑洞并不能描述普通恒星坍塌成为黑洞的情况，因为施瓦西黑洞描述的是静态的、没有角动量的黑洞，而实际上由普通恒星演变而来的黑洞都有角动量，即都是旋转的。正如英国物理学家保罗·戴维斯在其著作中所说，施瓦西黑洞的一个特性是"降落到施瓦西黑洞中的一个粒子(不是超光速粒子)在短时间后必然会到达中央奇点，而降落到克尔黑洞中的粒子可以完全避开奇点"[③]，正是通过对避开克尔黑洞的奇点的粒子去向的研究，克

① [英]克怀格·卡伦德，[英]拉尔夫·埃德尼．视读时间[M]．张颖，译．合肥：安徽文艺出版社，2007：105．
② [英]保罗·戴维斯．关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M]．崔存明，译．长春：吉林人民出版社，2002：337．
③ [英]保罗·戴维斯．关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M]．崔存明，译．长春：吉林人民出版社，2002：339．

尔提出了借助克尔黑洞进行时间旅行的理论。一些理论家通过对克尔黑洞的研究发现:①克尔黑洞并非真实的旋转黑洞。②克尔黑洞描述的进行时间旅行的通道具有不稳定性。③克尔黑洞内的奇点是“裸露的”。由于存在这样一些问题,克尔关于时间旅行的方法并不被广泛接受;此外,还有物理学家发现了爱因斯坦场方程的时间旅行解,正如英国物理学家保罗·戴维斯在其著作中所述:“1974 年,物理学家弗兰克·蒂普勒还发现了另一种描述旋转黑洞的爱因斯坦场方程的时间旅行解,这次是一个圆柱体的问题。时间旅行区域就在圆柱体表面的近旁。因为蒂普勒模型中没有奇点,所以它好像比克尔模型更自然一点。然而,它并非没有问题。最为明显的是,此解描述了无限长的圆柱体——显然是虚构的。而且,为了产生时间圈,圆柱体不得不以不可思议的速度围绕自身的轴旋转,并且冒着飞离离心力的危险,除非它由密度比核物质大得多的物质组成[①]”;还有科学家提出其他借助黑洞进行时间旅行的理论,并认为也许黑洞的中心就是宇宙的另外部分甚至过去的宇宙的通道,正如英国物理学家基普·S·索恩在其著作中所描述的,理论计算表明,“不可能从一个黑洞的中心穿过超空间到我们宇宙的另一部分。任何黑洞都不断受电磁真空小涨落和少量辐射的攻击。这些涨落和辐射落进黑洞时,被黑洞引力加速到巨大能量,然后暴雨般落向可能被人们借以穿越超空间的任何“封闭小宇宙”或“隧道”或宇宙飞船。计算不容质疑,任何做超空间旅行的飞船都会在启动前就被“暴雨”摧毁”[②]。维伦金等物理学家于上世纪 80 年代提出宇宙弦概念,他们认为,宇宙弦是在宇宙大爆炸发生的短暂时间内形成的集聚着巨大能量的无数细而长的管子,这种管子被称做宇宙弦。宇宙弦具有奇异的特性:其横截面的直径远小于原子的直径;任何物体可以径直穿越它而不会感受到有任何作用;宇宙弦的质量密度异常大,经计算 1 厘米长的宇宙弦的质量要远大于一座大山的质量,而且其质量取决于弦的张力的大小,张力越大、长度越大则弦的质量越大;一根单独的宇宙弦外面的时空是平坦的。J. R. 戈特(J. R. Gott)通过对宇宙弦的研究提出了一种进行时间旅行的理论,给理论所提供的方法是将两条相互平行且长度无限长的宇宙弦以接近光的速度作相对运动从而导致时空扭曲进而产生时间圈环并以此实现时间旅行。当然该方法仍然存在诸多难以解决的问题,而如何找到宇宙弦、如何将两根宇宙弦平行放置并使其作极高速的相对运动从而实现对宇宙弦的随意操作都仅仅只是停留在理论上,特别的宇宙弦是否真实存在还没有得到任何天文观测的证实。

最具影响力并被众多物理学家极力推崇的关于时间旅行的理论当属极具科幻

① [英]保罗·戴维斯.关于时间——爱因斯坦未完成的革命[M].崔存明,译.长春:吉林人民出版社,2002:340.

② [英]基普·S·索恩,S·霍金/序.黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵[M].李泳,译.长沙:湖南科学技术出版社,2000:451.

性质的时空的"虫洞"理论,"虫洞"这一概念虽然经常出现在科幻小说及影片中,但这一概念并非纯粹想象的产物而是有其理论的依据。该理论提出我们可以借助在时空中出现的"虫洞"实现时间旅行。那么虫洞到底是怎样的一种存在呢?所谓的"虫洞"是将时空中两个不同点连接起来的假想的隧道,隧道的两端各有一个洞口,这样借助"虫洞"可以从时空中的一点直接到达与之不同的另一点,也可以说"虫洞"是时空中不同的两点之间的捷径,从而也是时间维度上不同的两个时刻的捷径。正如英国物理学家基普·S·索恩在其著作中所描述的,"虫洞"同"传统意义上的隧道有一个重要区别。传统意义上的隧道是在已经存在的山体上凿出来的——没有隧道的时候山和山所盘踞的地方就已经在那里了——而蠕虫洞则是沿着一条全新的之前并不存在的空间管构建出一条连接空间中两个不同位置的通道。即使你把穿山而过的隧道废掉,那里的空间仍然存在。但你要把蠕虫洞移除的话,它原本所占据的空间就消失了[①]。"假如宇宙空间中存在一条"虫洞"连接着地球与遥远的织女星,这一假想的"虫洞"就是通往两星体间的一条假想的捷径。基普·S·索恩认为:"它有两个洞口,例如它有一个在地球附近,另一个在26光年远的织女星赤道附近。两个洞口通过超空间的隧道相连接(虫洞),可能只有1公里长。假如我们从地球附近的洞口走进隧道,只进过1公里,就到达另一洞口,出现在(从外面的宇宙看来)26光年远的织女星旁[②]。"那么,虫洞具有怎样的结构呢?相对论物理学家认为,存在于三维空间中的"虫洞"具有异常复杂的时空结构,其具体形态超出我们的想象,与具有三个维度的物体中的隧道的形态完全不同,因此我们只能借助二维空间中假象的"虫洞"的结构来推想三维空间中"虫洞"的情况。比如我们可以想象二维空间中的"虫洞"的洞口是一个具有二维结构圆形口,而"虫洞"则是具有二维结构的管子,那么存在于三维空间中的"虫洞"的洞口则是具有三个维度的球,而"虫洞"则是具有三维结构的管子。物理学家认为"虫洞"的洞口是一个球状物,与无旋转黑洞的球面视界类似但又有所不同,物理学家基普·S·索恩认为:"黑洞的视界是'单向'曲面,任何事物都能进去,但没有东西可以出来。而虫洞口是'双向'曲面,我们(实际上包括任何形态的物质)能从两个方向穿过它,可以走进洞里,也可以回到外面的宇宙[③]。""虫洞"实际上是爱因斯坦引力场方程的一种特殊解,这种解早在20世纪初就被发现了,可以说"虫洞"是四维时空中完全不同于黑洞的一种独特的时空结构。20世纪50年代后,物理学家对"虫洞"这种特殊时空结构的性质进行了广泛深入的研究,发现四维时空中的"虫洞"虽然具有

---

① [英]布赖恩·格林.宇宙的结构——空间、时间以及真实性的意义[M].刘茗引,译.长沙:湖南科学技术出版社,2012:496.

② [英]基普·S·索恩.黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵[M].李泳,译.长沙:湖南科学技术出版社,2000:451.

③ [英]基普·S·索恩.黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵[M].李泳,译.长沙:湖南科学技术出版社,2000:452.

复杂的结构，但这种结构的稳定性很差，并且在四维时空中出现的时空坐标甚至其存在的时间都具有不确定性。正如物理学家基普·S·索恩所认为的："它们每一个都随时间奇怪地演变：'虫洞'在某个时刻产生，短暂地打开，然后关闭、消失——从产生到消失，时间极短，没有事物(人、辐射或任何形式的信号)能再这么短的时间内从一个洞口穿过它到达另一个洞口[①]。"而且"照爱因斯坦场方程的预言，虫洞的寿命本来就很短暂，在辐射的随机打击下还会更短[②]。"既然"虫洞"的结构是不稳定的，那么如何才能维持虫洞的结构呢？实际上"虫洞"非常类似于量子力学中的虚粒子，而虚粒子是随机涨落的真空能，在后面的讨论中我们可以发现真空涨落所导致的"负能量"可以成为维持"虫洞"结构所需要的能量，因此"虫洞"也可以看做是随机涨落的时空的微观结构，它在出现后往往不等人们检测出其存在就很快消失，仿佛不曾出现过一样。另外，广义相对论的理论体系从未提供任何关于"虫洞"生成的机制，也就是说"虫洞"的出现没有任何原因及理由，与黑洞这种四维时空中的奇点结构不同的是，在广义相对论中"虫洞"完全是一个凭空出现的时空结构，因此人们很难相信其存在性。既然如此，那么"虫洞"怎么会成为物理学家如此关注的时间机器的呢？其中的关键在于物理学家经过深入研究发现了可以使"虫洞"保持其结构的方法，具体内容是借助某种与普通物质完全不同的奇异物质将"虫洞"这种时空结构支撑起来使其不至于瞬间瓦解。相对于普通物质或者虫洞之外的观察者而言，这种具有奇异性质的物质具有负的能量密度，从而其产生的引力作用的方向与普通物质所产生的引力的方向相反，也即奇异物质可以看做负引力物质，类似于宇宙学中为解释宇宙的加速膨胀现象而引入的暗能量概念。

对于奇异物质在虫洞中的作用索恩在其著作中进行了形象的描述："任何球状虫洞都将分散穿过它的光束。为看清这一点，想象光束在进入虫洞前经过一会聚透镜，这样光线沿径向向虫洞中心会聚，然后，光线继续沿径向穿行(它们如何还能运动呢?)，就是说，在从另一洞口出现时，它们沿径向散开，像图中那样离开虫洞中心。光束就这样解散了。

令光束解散的虫洞的时空曲率，是贯穿虫洞并使它张开的"奇异"物产生的。而时空曲率等价于引力，所以实际上是奇异物的引力让光束散开的。换句话讲，奇异物排斥光束的光线，把它们从它自己身边赶走，从而它们也相互分离散开了。

这与引力透镜发生的事情正好相反。在那儿，来自遥远恒星的光被途中的恒星或星系或黑洞的引力所吸引、聚焦；在这里，光却被散焦了[③]。"

---

① [英]基普·S·索恩.黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵[M].李泳，译.长沙：湖南科学技术出版社，2000：453.
② [英]基普·S·索恩.黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵[M].李泳，译.长沙：湖南科学技术出版社，2000：454.
③ [英]基普·S·索恩.黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵[M].李泳，译.长沙：湖南科学技术出版社，2000：455—456.

与黑洞完全不同，“虫洞”这种时空结构的出现不需要借助物质（包括奇异物质）的任何性质（如质量），也就是说“虫洞”结构的涌现是四维黎曼时—空的本质属性，即这种结构在弯曲的四维时空中会自然地、无条件地、随机地生成，但产生出来的“虫洞”结构却需要而且只能靠奇异物质才能够维持较长的一段时间，否则这种结构会很快消失就像从来不曾出现过一样，物理学家基普·S·索恩在其著作中就此提到了物理学家D.N.帕奇的研究结论：“打开任何（球状的、立方体状的或任意形变的）虫洞，都必须有奇异物穿过[①]。”这一结论的发现很快得到物理学界的广泛关注并成为物理学理论研究的新热点，物理学家们关注的重点是这种能够使得“虫洞”维持其结构的奇异物质到底是什么、在现代物理学中有无某种已知的物质现象或概念与之相对应、奇异物质是以什么方式存在的以及存在的前提条件是什么等问题，而如果这些问题能够得到解决，就能够为借助“虫洞”进行时空旅行的设想提供真正的理论依据，当时的情况正如物理学家基普·S·索恩在其著作中所描述的那样：“虫洞需要奇异物打开的发现，在1988—1992年间激起了理论研究热潮，中心问题是，‘物理学定律容许奇异物存在吗？如果是的，那应在什么条件下呢[②]？’”

而根据海森堡的不确定关系，由于真空涨落能够暂时从真空中的某一区域支取一部分能量而产生出虚粒子，虚粒子所具有的能量越大则存在的时间越短，实际上虚粒子存在的时间极其短暂使得我们的测量仪器根本无法直接观察到其存在，而由于正常情况下真空的平均能量为零，那么当真空中的某一区域被支取一部分能量后这一区域的能量就变为负值，而这一负能量与打开“虫洞”的奇异物质具有完全相同的性质，从而真空涨落能够产生出奇异物质。当然这需要具备一定的条件，物理学家经过研究发现了真空涨落产生出奇异物质的条件，正如物理学家基普·S·索恩在其著作中所描述的：“在平直时空，即在远离一切引力物体的地方，真空涨落不可能是奇异的——它们不可能具有光束看到的负平均能量密度。——而在弯曲时空的很多情况下，曲率会扭曲真空从而使它们成为奇异的[③]。”

除了弯曲的时空能够将真空扭曲成为奇异物质外，在真空中平行放置的两块金属板也能够在真空中产生出奇异物质，卡西米尔（H. B. G. Casimir）于1948年提出了具体的方案并进行了相应的实验，实验结果发现在两块金属板间产生的负能量密度虽然非常小，但效应是真实存在的，从而物理学家从实验上证实了所谓的奇异物质的存在。找到了能够与物理学理论相协调的奇异物质，接下来物理学家需要做的工作自然是如何去发现甚至制造出可以借以实现时间旅行的“虫洞”来，通

---

① [英]基普·S·索恩.黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵[M].李泳，译.长沙：湖南科学技术出版社，2000：457.
② [英]基普·S·索恩.黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵[M].李泳，译.长沙：湖南科学技术出版社，2000：456.
③ [英]基普·S·索恩.黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵[M].李泳，译.长沙：湖南科学技术出版社，2000：459.

常认为有两种方法可以获得"虫洞":一种是量子力学的方法,这是从微观尺度的量子泡沫(即实际存在的"虫洞")中发现并取出"虫洞"的方法;另一种是经典物理的方法,即通过将时空扭曲而不是在时空中凿洞并制造出"虫洞"从而在没有"虫洞"的时空中生产出"虫洞"的方法。物理学家基普·S·索恩认为:"我们今天对量子引力的认识还不足以确定用量子方法构造虫洞是否可能。而我们对经典引力定律(广义相对论)的足够认识则确实令我们相信,用经典方法构造虫洞是允许的,但是不论构造者是什么'机械',时间在所有参照系看来都会被它强扭曲,结果,它(至少在短时间内)成了一台时间机器①。"

那么"虫洞"如何能够成为时间旅行的机器呢?或者说"虫洞"的内部以及两个洞口处的时间相互之间具有怎样的特性呢?物理学家借助广义相对论对"虫洞"的深入研究发现,在"虫洞"内部以及"虫洞"的洞口处可以具有不同的时间流。特别是如果从外面的宇宙中看"虫洞"的两个洞口之间分别处于相对之间高速运动的两个参照系中时,物理学家基普·S·索恩认为:"虫洞的两个洞口一定经历着不同的时间流,而从洞里看,两个洞口是相对静止的,所以(两个洞口)同在一个参照系中,这意味着洞口一定经历着相同的时间流"②,这一切都可以借助广义相对论进行精确描述,而正是由于"虫洞"的洞口及隧道之间奇特的时间流使得人类可以借以实现时间旅行。虽然物理学家认为借助"虫洞"可以实现时间旅行,但这并不意味着人类实现时间旅行的梦想很快就可以实现,按物理学家基普·S·索恩的观点:"就算是物理学定律允许时间机器(在本章最后可以看到,我怀疑这一点),人类现在的技术能力离它还远得很,比洞穴野人离太空旅行还要远"③,也就是说仅从物理学角度上看要借助"虫洞"实现时间旅行仍然有很长的路要走。首先,要找到或制造出可供人类实现时间旅行的"虫洞"本身就是极具挑战性的工作,如果在当前宇宙空间中存在"虫洞",那么我们应该如何找到这些"虫洞";如果"虫洞"不存在,那么我们要如何才能制造出"虫洞"等等都是极其困难的事情;其次就算是找到了合适的"虫洞",要撑开并维持足够尺寸的、可供人类进行时间旅行的"虫洞"这种时空结构并非易事,正如刘辽教授等在其著作中所提出的:"要撑开半径为1厘米的虫洞,需要相当于一个地球质量的异常物质;撑开一个半径1千米的虫洞,需要相当于一个太阳质量的异常物质;撑开一个半径1光年的虫洞,则需要大于银河系发光物质总质量100倍的异常物质"④;另外还需要对为我们人类提供时间旅行的"虫洞"进行经常性的维护,而要如何维护才能使其不至于塌缩同样是非常艰难复

① [英]基普·S·索恩.黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵[M].李泳,译.长沙:湖南科学技术出版社,2000:464.
② [英]基普·S·索恩.黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵[M].李泳,译.长沙:湖南科学技术出版社,2000:468.
③ [英]基普·S·索恩.黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵[M].李泳,译.长沙:湖南科学技术出版社,2000:482.
④ 刘辽,赵峥,田贵花,张靖仪.黑洞与时间的性质[M].北京:北京大学出版社,2008:210.

杂的工作，因为有哪些因素会导致“虫洞”的坍塌仍然没有经过详细的思考。

即使这样，物理学家基普·S·索恩并不认为所有问题都已经解决，特别是关于“量子引力定律是不是允许（或禁止）时间机器：时间机器总会在它们运行的瞬间自我毁灭吗？”[①]；以及“电磁场的真空涨落很可能是一种奇异物：在很多不同的情况下，它们在弯曲时空里都可以表现出奇异性（在光束看来，具有负平均能量密度）。然而，我们不知道它在虫洞内是否还能奇异，从而为我们把洞打开”[②]等问题仍然没有答案。

显然，以上物理学界关于“虫洞”的所有讨论都是粗略的、近似的纯理论讨论，完全没有获得任何有关实验数据的支持。而真正意义上的时间旅行实际上是一个系统工程，有无数细节问题需要进行深入研究，而且每一个问题都可能决定时间旅行的成败。当然，这里关于借助“虫洞”实现时间旅行的论述还没有涉及时间旅行过程中的诸多悖论，而如果人类要借助“虫洞”进行时间旅行，那么对利用“虫洞”所进行的时间旅行而言我们前面所讨论过的所有关于时间旅行的悖论仍然是无法避免的，因为这些时间旅行者悖论并未在任何一种“虫洞”理论中有所涉及，也就是说时间旅行悖论仍然是横亘在“虫洞”理论面前的一条鸿沟，这是“虫洞”物理学家无法回避的。当然，这些悖论对于时间旅行而言究竟意味着什么仍然处于争论之中，特别是时间旅行真的可以无视那些关于时间旅行的悖论吗？而关于借助“虫洞”可以实现时间旅行的理论确实触及到了问题的本质了吗？抑或仅仅是一种假象？

4.3 时间旅行在现实中没有任何实现的可能

通过我们上面的讨论可知，一部分物理学家基于广义相对论的场方程发现了“黑洞解”及“虫洞解”，并认为这些解能够为所谓的时间旅行的实现提供理论依据，同时提出如果以这些可能存在的对象为中介就可以实现时间旅行，显然，这只是一部分物理学家的观点。对于人类实现时间旅行的可行性，多数物理学家都持否定态度，但这些物理学家的看法基本上都是基于广义相对论的理论计算，即认为人类要实现时间旅行就必然要消耗数量大的惊人的能量，这样，从技术上角度（而非原则上）看要真正实现时间旅行是异常困难从而几乎是不可能的，也就是说这些物理学家仅仅从技术角度而没有从根本上否定时间旅行的可能性。这也就意味着由于广义相对论的场方程存在允许向过去进行时间旅行的解，因此时间旅行原则上是无法回避的问题，英国物理学家布赖恩·格林就持有这一观点：“对时间旅行进行的最新研究表明：在物理学定律中，不存在十分明显的事物能在理论上阻止其发

① ［英］基普·S·索恩．黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵［M］．李泳，译．长沙：湖南科学技术出版社，2000：490.

② ［英］基普·S·索恩．黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵［M］．李泳，译．长沙：湖南科学技术出版社，2000：464.

生，尽管在所有被研究的事例中，只有以最极端、最奇特的方式操纵物质和能量，时间圈才得以形成[①]。”特别是：“没有人能够证明物理定律已经将回到过去的时间旅行排除掉了。正相反，倒是有几个物理学家列出了几条建造时间机器的理论方法。要是你拥有无限的技术能力，可以任意地运用已知的物理学定律，那么你就有可能建造出一台时间机器（我们所说的时间机器指的是既能飞往未来也能回到过去的时间机器）[②]。”当然，也有物理学家根据科学计算的结果认为时间旅行是不可能实现的，英国物理学家霍金就持有这种观点，以下是物理学家杜欣欣女士和吴忠超先生在其著作中引述霍金的观点：“爱因斯坦的引力是将万有引力归结为时空的曲率。那么时空能否被弯曲得这么厉害，以至于人们可以返回到过去以改变历史吗？严格的科学计算指出，这是不可能的[③]。”那么物理学定律特别是广义相对论真的允许我们进行时间旅行吗？物理学定律真的可以无视各种与时间旅行相关的悖论吗？建立在能量守恒定律基础之上的广义相对论会因为允许时间旅行解的存在而导致能量守恒定律的破坏吗？结构优美的广义相对论真的会导致时间旅行悖论这样“丑陋”的、与其理论体系不协调的结论存在吗？我们的看法是广义相对论中引力场方程的时间旅行解从本质上说是对广义相对论理论的错误解释的结果，时间旅行从根本上说是无法实现的，下面我们从五个方面对此进行论述。

（1）各种时间旅行悖论的存在是物理学理论特别是广义相对论理论体系不完备性的表现。我们知道，悖论是指那些表面上能够自圆其说的命题或理论体系在逻辑上却可以推导出互相矛盾的结论，由于这种矛盾并不存在于自然界的任何物质及其变化过程中，因此，悖论实际上是人类认识上的而非现实中客观存在着的矛盾。由于时间旅行悖论是人们在思想中模拟的、而非在实际实施的时间旅行（现实的时间旅行能否进行还没有得到任何科学实验的证明）过程中所产生的，是人类思考时间旅行问题时必然会出现的矛盾，从而时间旅行悖论只能是人类认识上的而非现实世界本身存在的矛盾。由于现实世界绝对不可能存在任何矛盾，从而能够完全正确地描述现实世界的科学理论也是不可能存在任何矛盾的（当然，这样的科学理论原则上是不可能真正建立起来的），因此时间旅行悖论的出现说明导致悖论的广义相对论对时间本质的理解及认识是有问题的，也就是说从本质上而言时间旅行悖论的出现是该理论的概念体系不完备的表现。正如王习胜博士在其著作中所说：“科学理论是知识领域中内在逻辑最为严密的部分。受逻辑思维第一规律——不矛盾律的制约，维护认知和求知的成果和结晶的内在相容性与外部一致

① ［英］保罗·戴维斯．关于时间——爱因斯坦未完成的革命［M］．崔存明，译．长春：吉林人民出版社，2002：345．

② ［英］布赖恩·格林．宇宙的结构——空间、时间以及真实性的意义［M］．刘茗引，译．长沙：湖南科学技术出版社，2012：493．

③ 杜欣欣，吴忠超．无中生有——霍金与《时间简史》［M］．长沙：湖南科学技术出版社，2010：79．

性，一直是人们在知识领域中的不懈诉求。如果在这部分知识中出现了逻辑矛盾，那么，人们在知识领域企求确定性和理论系统化的梦想就可能会化为泡影[①]。”由于只要涉及时间旅行，由此而导致的各种悖论就是无法消除的，而由于物理定律特别是广义相对论无法阻止时间旅行解的出现，也无法阻止各种相关悖论的出现，也就是说物理学定律必定与各种时间旅行的悖论相并存，物理学定律必定会因为允许时间旅行而导致逻辑悖论，可见物理学特别是广义相对论在逻辑上并非自洽的。如果一个理论体系会导致悖论的产生，那么对该理论体系而言并不是好兆头，这种情况下我们就需要对该理论体系给予特别的警惕，而不是对这些悖论采取漠视的态度。由于逻辑上的自洽性是理论体系完备性的前提条件(也是理论家们奋斗终身的目标)，如部分数学理论就是因为悖论的出现而成为不完备的，而且也是在解决所在领域的悖论中不断发展的，从而广义相对论的概念体系也需要在解决悖论过程中进一步发展，特别是广义相对论的发展应该而且必须以消除悖论从而消除或者重新诠释场方程的时间旅行解为目的之一。

我们前面也提到过，对于模拟的时间旅行中出现的各种悖论物理学家也非常重视，为了消除各种时间旅行悖论，物理学家们提出了多种解决问题的方法，其中最重要的有英国著名物理学家霍金提出的“时序保护猜想”、美国麻省理工学院希斯·罗埃德教授提出的“后选择模型”以及大卫·多奇为解释量子现象的奇异性而提出的“平行宇宙模型”。实际上霍金提出“时序保护猜想”的目的是从根本上否定时间旅行的可行性：“霍金对时间机器有着严厉的批评，他认为大自然也憎恶它们；他把这种憎恶表达为一个猜想，一个能维护时间次序的良序猜想，它指出，物理定律决不允许时间机器。霍金猜测，大自然就是通过真空涨落束的生长来加强维护时间顺序的：当我们想做时间机器时，不论用什么样的事物(如虫洞、旋转柱、宇宙弦或其他什么东西)，在它成为时间机器前，总会有一束真空涨落穿过它，并破坏它[②]。”由于在“时序保护猜想”起作用的情况下进行时间旅行是不允许的，因此也就避免了各种时间旅行悖论的产生。而“后选择模型”似乎是专门为时间旅行悖论量身定做的理论，该理论允许进行时间旅行但却严格禁止因时间旅行所导致的各种悖论的产生。其实，如果自然界真的允许进行时间旅行，那么在各种模拟的时间旅行中可能出现的悖论在真实的时间旅行中是绝对不可能出现的，因为自然界本身就不可能出现悖论，并且在这种情况下所谓的“后选择模型”也就成为多余的了，因此“后选择模型”并没有从根本上解决而仅仅是简单地回避了各种时间旅行悖论。就解决时间旅行悖论的彻底性而言，物理学家最感兴趣的还是“平行宇宙模

---

① 王习胜.泛悖论与科学理论创新机制研究[M].北京：北京师范大学出版社，2013：141.

② [英]基普·S·索恩.黑洞与时间弯曲——爱因斯坦的幽灵[M].李泳，译.长沙：湖南科学技术出版社，2000：486.

型”。这种模型允许无数个相似而又略有不同的可能的宇宙“平行”地存在，任何人在任意时刻只能出现在其中一个宇宙中，因此对人类在时间旅行中出现的任何一个结果都会有一个宇宙与之对应。如A回到过去并杀死了还未怀上A的母亲的外祖母，那么在这个被A杀死其外祖母的宇宙中A永远都不可能出生，而回到过去的A则来自另一个其外祖母并没有被杀死的宇宙中，从而A并没有改变过去的任何状况。这种情况下所谓的时间旅行实际上就是从一个宇宙到达另一个与之平行的宇宙中的“宇宙际”之旅，在这样的旅行中各种模拟的时间旅行中出现的悖论都绝对不会出现。虽然“平行宇宙模型”对模拟的时间旅行中出现的悖论的确提出了独到的解决办法，但在平行宇宙之间的旅行与我们通常意义上的时间旅行还是有本质区别的，因为这种情况下A到被A杀死其外祖母的宇宙中的旅行并非是到A所出生的宇宙的过去进行的时间旅行，也就是说A不可能回到A所出生的宇宙的过去旅行，否则悖论仍然会出现。显然，“平行宇宙模型”提出了存在无数个没有相互作用并且在任意时刻我们只能处于其中之一的宇宙的观点，完全是形而上学式的模型，该模型将量子力学中用于描述粒子的各种力学量的可能性问题的方法移植到对宇宙的描述中，将原本只具有可能性的、存在于理论描述中的概念实在化，即将所谓可能的宇宙概念实在化，这种模型与“上帝”的概念类似，是根本无法借助科学实验对其存在性进行证明的。对于抽象的数学理论这样的方法还可以被接受，但对用于描述现实世界的物理学理论而言，如果我们仅仅满足于永远无法用实验去检验其正确性的理论描述，显然是无法令人满意的。综上所述，迄今为止，模拟的时间旅行中出现的各种悖论仍然没有得到很好的解决，而物理学家所做的仅仅是借助各种复杂的模型规避了模拟的时间旅行悖论的出现，所以真正意义上的时间旅行是否可能仍然是成问题的。

(2)时间旅行的实现意味着能量、动量等物理量的守恒定律乃至热力学第二定律等物理学定律将遭受彻底破坏从而不再成立。各种物理量的守恒定律告诉我们，尽管宇宙万物千变万化，但这所有的变化绝不是杂乱无章、没有规律的，最基本的规律就是各种守恒定律以及热力学第二定律。能量守恒是最为重要、最具普遍意义的守恒定律，其基本意义是能量既不会凭空产生，也不会随意消失，只能从一种形式转化为另一种形式，或者从一个物体转移到另一个物体，但在转化或转移的过程中其总量不变；而热力学第二定律则告诉我们宇宙间任何物质的变化都具有方向性，都只能向熵不断增大的方向进行，与之方向相反的变化过程则绝对不可能发生。我们知道，包括能量守恒定律在内的物理量的守恒定律及热力学第二定律是经过无数实验证明了的物理学定律，是任何物理学理论体系都必须遵循的具有普遍意义的定律，是任何宏观自然科学理论体系的基础，因此，如果一个科学的理论体系最终导致对能量守恒定律以及热力学第二定律等的破坏，那么这个理论体

系必定是不可能正确的。由于广义相对论的理论体系建立在能量守恒定律的基础之上，从而必须遵循能量守恒定律。但我们前面的分析表明，直接到过去或未来的时间旅行必然会导致对各种守恒定律包括能量守恒定律甚至热力学第二定律的破坏，导致对支持时间旅行的广义相对论理论基础的否定并最终导致对广义相对论自身的否定。显然，时间旅行导致的对包括能量守恒定律在内的各种守恒定律以及热力学第二定律的破坏即使是借助“后选择模型”及“平行宇宙模型”也根本无法解决。由于真实的自然界不可能出现悖论，而“后选择模型”及“平行宇宙模型”仅仅是为了解决时间旅行中出现的各种悖论而提出的，虽然这两种模型的确消除了时间旅行中出现的一些悖论，从而在这两种模型的框架下似乎可以进行所谓无悖论式的时间旅行，而如果允许进行所谓的时间旅行，那么得到无数科学实验验证过的守恒定律特别是能量守恒定律就必定要遭到彻底的破坏，这是借助任何模型也无法解决的问题。众所周知，至今没有任何一例宏观意义上的科学实验表明包括能量守恒定律在内的各种守恒定律以及热力学第二定律遭到破坏，实际上这些定律是绝对不可能遭到破坏的，否则，以这些定律为基础的物理学至少是经典物理学都将成为无根之木、空中楼阁。因此可以说如果包括能量守恒定律在内的守恒定律以及热力学第二定律真正具有普遍意义，而且经典物理学真正建立在这些定律的基础之上，那么时间旅行必定是不可能的，因此广义相对论中各种所谓的时间旅行解（如虫洞、旋转柱等）必须进行重新诠释。

(3)我们的世界至今仍然没有来自未来的时间旅行者这一事实意味着时间旅行是不可行的。对于时间旅行的可能性也可以采用反证法进行论证，即假定到过去或未来的时间旅行是可行的，那么未来的人类到我们的现在（即未来人类的过去）所进行的时间旅行也是可行的，并且由于未来人类的科学技术必定高度发达，他们一定能够掌握关于时间旅行的各种相关知识及技术并造出时间机器，那么，现在我们的世界必定会有无数来自未来的人类的造访，但令人遗憾的是时至今日我们根本没有发现哪怕一例来自未来人类社会的造访者，由此可以反证时间旅行是不可能的。不久前著名英国物理学家斯蒂芬·霍金就做过类似的实验，并认为这一实验证明了时间旅行的不可能性。

“据国外媒体报道，2009 年 6 月 28 日，著名物理学家斯蒂芬·霍金曾举行了一场派对，邀请时间旅行者参加。不过，霍金在派对结束后才寄出请柬。这是对时间旅行者的一次终极考验。不幸的是，时间旅行者对霍金的派对不理不睬，没有一人参加。霍金将这场派对视为一项实验，没人赏脸则是一个证据，证明时间旅行不可能实现。

据美国科技博客 Ars Technica 报道，这位《时间简史》作者解释说：‘我得出了一项实验证据，证明时间旅行不可能实现。我为时间旅行者举行了一场派对。不

过，我在派对结束后才寄出请柬。我等了很长时间，但没有一个人露面。'

霍金在派对现场拍摄了一幅照片。照片中，霍金一个人坐在房间里，四周是他为时间旅行者准备的烤面包和香槟酒。他耐心等待，等待时间旅行者推门走进房间。不过，结果让他失望了。

霍金在接受 Ars Technica 采访时表示：'爱因斯坦的广义相对论认为时间旅行可以实现。我们可以扭曲时空，回到过去。不过，扭曲时空将产生可怕的辐射，摧毁飞船，甚至有可能摧毁时空'[①]。"

实际上，霍金的这一实验非常简单的，不需要任何先进的科学仪器从而没有什么技术含量，任何人在任何场合都可以进行类似的实验，并且实验结果都必定会完全一样。通过霍金所作的这次试验我们可以发现，虽然霍金坚信时间旅行是不可能实现的，但他也没有从理论上否定时间旅行的可能性，而仅仅将现实中没有实现这种旅行的原因归结为旅行者在进行时间旅行过程中扭曲的时空会对其产生致命的影响，正是这种影响必然导致时间旅行的不可能。但我们下面的分析将告诉我们，广义相对论中关于时空的弯曲结构以及虫洞结构等被认为是时时间旅行的前提条件的这些结论其实是我们对狭义及广义相对论中所谓的时间膨胀及时间弯曲这些错误概念的数学推论的结果，是不可能正确的。除霍金的实验之外，最近有科学家如美国密西根理工大学天体物理学家涅米罗夫提出另外一种方法，即"通过搜寻过往推特贴文，寻找时空旅行证据。他们查询过去的推文，看看 2013 年 3 月罗马天主教选出教皇方济各、艾桑彗星 2012 年 9 月被追踪到前，推特上有没有人提过这两个名词。如果某人 2011 年的推文、脸谱网站贴文或博客文章曾提到，那此人可能是"游历未来后返回现代"。不过，没人在网络上贴出'未卜先知'的只字片语。涅米罗夫说，如果有人'穿越时空'，说些暗示未来的话，就能证明'时空旅行'的概念。研究人员通过搜集社交媒体上的贴文，没有发现任何人有能力'游历未来'以及'未卜先知'[②]。"这些实验尽管都很简单，没有复杂的理论证明，但却明确地告诉我们迄今为止仍然没有来自过去的时间旅行者到过我们的文明社会，从而间接证明从过去到现在的时间旅行是不可能真正实现的。当然，可能会有人对类似的实验之所以没有成功提出理由认为也许人类社会已经在还未造出时间机器前就毁灭了，但这恰恰证明了至少对我们人类社会而言是无法造出时间机器的，也就是说对人类社会而言没有任何实验的证据证明时间旅行是可行的；当然，有人可能还会提出也许未来的人类社会已经造出了时间机器，只是时间旅行者在借助时间机器进行时间旅行的过程中时间机器被损坏了，所以无法来到我们现在的世界。

---

① 霍金设宴验证时间旅行：宴会结束才寄请柬[EB/OL]. [2012—07—05] tech. sina. com. cn/d/2012—07—05107447350517. shtml.

② 人类能否"穿越"时空？专家称未发现任何证据[EB/OL]. [2014—01—08]中国新闻网.

其实,所有这些用来说明未来的人类原本可以但又为什么实际上没有到我们现在的世界进行时间旅行所谓的理由完全是想当然、牵强附会、没有任何说服力的,说白了就是在为自己的说辞寻找搪塞开脱的理由罢了。

(4)无论如何,可以进行时间旅行这一结论完全建立在时间是一维的这一假设的基础上的,而如果时间的维度是零,则时间旅行根本无法进行。一直以来物理学乃至所有自然科学理论中都将时间的一维性当做不需要进行任何讨论及证明的公理引进的,并且在狭义以及广义相对论中爱因斯坦更进一步地将时间与空间看做完全相同的结构,从而整合为所谓的四维时空。但通过前面关于空间维度的讨论我们知道,空间之所以可以成为具有维度的拓扑结构,关键在于空间作为一个点集其所有的点在任意时刻可以以一个整体的形式同时存在,从而原则上可以独立于物质及其变化过程而存在,也就是说我们可以将其所有的点在任意时刻同时存在当做空间的维度不为零的前提条件。而时间则不具有这种特点,因为在时间维度上的任意时刻(即时间点)只能有一个点存在,并且如果假定时间的维度不为零,那么时间维度将可以独立于物质及其变化过程而存在,因此,在这个意义上我们可以说时间的维度是零,也即时间与空间是完全不同的。因此,可以说相对论中所谓的四维时空其实是三维闵科夫斯基空间以及三维弯曲的黎曼空间,而这一结论与我们在 1.2 章节中的结论即相对论中的四维时空实际为虚拟的、测量意义上的结论完全一致。另外,从前面关于时间旅行的前提条件我们知道,时间旅行之所以被人们认为是可以进行的,关键在于时间被认为是一维的,因此我们可以像在三维空间中的任何点上随意移动一个物体那样在时间维度上将一个物体进行相同形式的移动,即从时间维度上的一个时刻到达另一个任意的时刻,通俗地说就是从“现在”的时刻到达“过去”或者“未来”的任意一个时刻,而如果时间的维度是零,即在任意时刻时间维度上同时存在的点只有一个,那么我们显然不能够在时间维度上随意移动。由于时间的维度是零,因此,我们不可能在时间维度上进行时间旅行,即不可能从“现在”的时刻直接到达“过去”的或者“未来”的时刻。

(5)最为重要的是,我们在上面的论述中得到的关于广义相对论中所谓的四维时空的虚构性以及时间不具有方向性这些结论说明我们想象中的时间旅行是绝对不可能实现的,从而谈论其可能性是没有任何意义的。在前面 1.2 章节中我们通过详细的论述得到了一个非常重要的结论,即物质的质量导致物质周围的三维空间的弯曲,而三维空间的弯曲又导致了一切在弯曲的三维空间中物质完成其变化过程需要的时间相对增大,从而放置于弯曲的三维空间中时钟的钟摆完成其每一个摆动周期所需要的时间增大,同时使得该时钟的计时单位也增大。这样,使用这种时钟对同样的时间进行计时所得到的时间值就变小,这显然是时间的测量值的相对变小,也就是说是时钟对时间的测量值(而非时间本身)具有相对性,从而可以

说在狭义相对论乃至广义相对论中与三维空间构成所谓的四维时空的是测量意义上的时间或者是对时间的测量值而非时间本身，因此对时间进行测量获得的测量值（而非时间本身）具有相对性，也就是说时间本身与弯曲的三维空间不可能构成所谓的弯曲的四维黎曼时一空。因为时间本身并不具有相对性，而且在弯曲的三维空间中时间本身也不可能发生弯曲，从而广义相对论中的所谓四维弯曲的黎曼时空中的时间维度完全是用对时间本身的测量值人为构造出来的。这样，由广义相对论的场方程所得到的“虫洞”或者“旋转柱”解等所谓的时间旅行解也不可能是真正意义上的时间旅行解，充其量只能是具有奇异结构的三维空间解，也就是说所谓的“虫洞”实际上是联结三维空间中两点之间的捷径。从而我们借助“虫洞”可以而且只能实现星际旅行而无法实现时间旅行，也就是说“虫洞”可以成为联结地球与遥远星系之间空间上的捷径，如果直接在正常的三维空间中从地球出发到遥远的星系进行星际旅行，需要经历漫长的时间，而借助“虫洞”则可以大大缩短相应的星际旅行时间。

另外从前面的1.4及1.5章节我们知道，一切物质的变化过程都具有时间倒流变换不变性，也就是说时间的倒流（比如广义相对论认为在“旋转柱”周围或黑洞附近时间会发生极度的弯曲从而最终改变流逝的方向）并不能导致物质变化过程方向的改变以及对物质的变化过程产生任何影响，从而即使时间的方向真的改变了，我们也不可能借助任何手段检测到这种改变，也即时间方向的改变对一切物质的变化过程而言没有任何意义，也可以说时间是没有方向的，从而时间没有过去、现在以及未来之分，而过去、现在以及未来只是一切物质的变化过程的表现形式，一切物质的变化过程总是表现为从还未发生从而还不存在到正在发生再到已经发生过从而已经不存在。这样，试图借助广义相对论中场方程的“虫洞”解或者“旋转柱”解来改变根本就不存在的所谓时间的方向从而到达原本就不存在的过去的时刻显然是荒唐的、没有任何意义的。综合上面两方面的讨论可见，我们想象中的所谓的时间旅行根本就是不可能的，广义相对论中关于借助“虫洞”或“旋转柱”进行时间旅行的设想完全是对场方程的奇异解的错误理解导致的，因此，我们必须对这些广义相对论的奇异解的意义进行重新诠释，才能正确理解广义相对论的全部内容而不至于导致悖论以及毫无意义的结果。

通过上述关于时间旅行必然会导致无数自然界不允许存在的悖论（或矛盾）、必然导致对各种守恒定律的破坏、至今尚未发现来自未来的时间旅行者、时间旅行的前提条件的存在性以及广义相对论中关于时间旅行解的真实意义等几方面问题的论述我们可以得到确定的结论：时间旅行本质上而言是不可能实现的，时间旅行的可行性是我们对相关的物理学方程中关于时间概念乃至时间的本质错误理解的结果，因此人类企图实现时间旅行的任何努力都不可能成功，这一结论反过来又证

明广义相对论中关于黑洞及虫洞的时间旅行解完全是人们对广义相对论的相应解的错误诠释。物理学家获得时间旅行是可行的这一结论依据的是时间的一维性假设以及广义相对论的一些奇异解的诠释，我们知道，这些依据都是建立在对时间本质的错误理解基础之上，因此，是不可能获得正确的结论的；与之相反，我们从上述讨论中所作出的结论具有更加广泛的科学依据及理论基础，从而可以确保结论的可靠。

结束语

通过上面对时间及其各种性质的全面、详细的论述，我们对时间的本质有了更深入的认识，为使读者对本书的内容有一个全面的了解，非常有必要对本书的思路及结构进行大致的梳理。由于时间与物质的存在及变化过程之间具有密不可分的关系，因此，我们在探讨关于时间的本质问题之前必须对物质的存在及变化过程的性质有全面、深入的了解，否则，对时间的本质问题的论述将空洞无物、残缺不全。只有循着这条路线，我们才能够一步一步地揭示出时间的各种性质，从而达到我们的目的，最终形成对时间的正确认识。而就物质的存在及变化过程而言，自然科学特别是物理学则提供了大量现成的知识可供我们参考，但我们知道，正是由于物理学特别是相对论及量子力学的许多超出我们想象的结论对我们关于时间的常识性观念造成了最严重的冲击，使得我们几千年的人类文明积累起来的关于时间的各种直觉的观念遭受了最为严重的危机，并且因此导致了各种似是而非的时间观，导致了时间概念与空间概念之间的彻底混淆，从而使得时间概念变得越来越混乱、越来越难以理解。实际上，在现代物理学理论获得突飞猛进的今天，我们已经迅速地远离能够形成正确的时间观念的原点，试图建立能够描述所有物质现象的物理学终极理论这一梦想如海市蜃楼一样吸引着众多的物理学家，在这种氛围下几乎所有的物理学家对最基础的概念的意义的探究已经失去了兴趣，正因如此，再想要返回问题的初始点已经非常困难。

因此，在这种情况下要形成正确的时间观念，我们就必须在描述各种物质变化过程的知识中重新找到对时间概念造成混乱的根源，这也正是我们必须从爱因斯坦在建立相对论之初特别关注的几个理想实验的分析入手的缘故，因为所有在相对论的理论体系建立之后对时间概念理解上的混乱都是从这里开始的。实际上，我们在对这些理想实验进一步的分析过程中确实发现了爱因斯坦的相对论中关于时间的一些性质的推论（如时间在高速运动的参照系中会发生相对膨胀、而在大质量的物质周围会发生相对弯曲等）是经不起仔细推敲的，因而是有问题的。另外，经过深入我们思考会发现，在我们关于时间的常识性观念中的时间的方向性及流动性是与辩证唯物主义哲学体系是相冲突的，因为辩证唯物主义告诉我们时间不可能独立于物质及其变化过程而存在，但我们的直觉却允许不具有任何物质形态的时间具有方向、可以流动，这本身就是不可想象的事情；特别是热力学又进一步

提供了所谓的证据证明这样一个似是而非的观念，而热力学作出此项结论的唯一证据却来源于所谓的时间反演变换的操作性定义。因此为了达到正确理解时间的本质这一目的，我们同样也必须对时间的反演变换的定义进行详细诠释。而我们通过对当前物理学教材及学术中已经被学者广泛接受的时间反演变换定义的深入的分析确实发现了这一定义的缺陷，并据此提出了更加合理、与当前学术界所使用的定义完全不同的时间反演变换以及时间倒流变换的新定义。在新的操作性定义中，物质变化过程(特别是热力学中系统变化过程)的方向性与时间的方向没有任何关系从而完全不受时间的方向性的影响；而一切物质的变化过程的时间倒流变换不变性则进一步否定了时间的方向性以及时间的流动性。在本书中，我们通过对物理学中一些似是而非的概念的深入分析并对其进行了重新定义，在此基础上逐步建立了全新的时间概念体系，在这一概念体系中我们确立了时间所具有的一些新的性质，如时间的测量值而非本身的相对性、无方向性及不流动性，而且从这些关于时间的各种性质中应该不会产生任何悖论，同时所有相关论述前后关联、相互印证，构成一个完整的体系。而更为重要的是，在新的时间理论体系中，被相对论物理学家广泛论述的关于时间的旅行的实现也被认为是不可能的，从而从根本上消除了关于时间的最大的悖论——时间旅行者悖论。

在本书中我们通过对相对论及量子力学中与时间概念有关的重要结论详细、深入的分析，获得了关于时间的各种性质的系统认识，同时也使我们对物理学中一些重要的概念有了全新的理解，更重要的是使我们认识到了自然科学中一些被认为是定论的、毋庸置疑的知识可能不一定经得起仔细分析、推敲。因此，我们对自然科学理论必须始终抱持敬畏但不盲从的态度，才能获得真正扎实、可靠的知识，才不至于沦为知识的奴隶，并且才能够有新的理解并产生新的认识。最后，我们用意大利著名物理学家卡尔罗·罗威利辩证的科学观来结束全文：“科学的基础就是批判性的思维，即强烈认识到我们对世界的认识总是片面的、主观的、模糊的、局部的、简单的。我们要不断努力探寻真谛，开阔眼界，扩大视点。但这绝非易事，因为从某种程度上讲，我们是自己思想的囚徒，很难走出自我思想的牢笼。我们难以从外界去审视和改变自己的思想。我们必须从自我内在的失误中，去设法发现我们的错误所在。若用一幅生动的形象来比喻，这就如同一边航行一边造船。科学就是我们一面进行思考，一面努力地去重新建立和梳理我们的思想，没有任何形式的人类知识能够像科学那样让我们作出可靠的预测。……然而，任何科学理论，即使是最有效的理论，迟早都会被更好的理论所取代①。”

① [意]卡尔罗·罗威利. 假如时间不存在？——讲点颠覆常理的科学[M]. 李润，译. 北京：化学工业出版社，2013：62—63.

附论文：

物理量及物理方程的时间反演变换

——当前存在的问题及系统的解决方案

李大庆

摘要 通过对当前普遍采用的物理量的时间反演变换定义的详细分析，发现了时间对称变换为时间反演变换的前提条件，并获得与当前普遍接受的观点不同的结论：时间反演变换只改变物理过程的方向而没有改变时间的方向；之后以新的时间反演变换的定义内容为基础对物理量的微分、导数及常用算符的时间反演变换进行了分析并获得了重要结论；并据此对重要物理方程的时间反演变换进行了讨论，并在讨论中获得了重要结论：描述最基本物理过程的方程具有时间反演变换不变性以及热力学过程的单向性与时间箭头无关。

关键词 物理量，物理方程，物理过程的方向，时间的方向，时间反演变换

中图分类号：O411　　文献标识码：A

引言

按通常的观点，时间反演变换是一种将物理量及物理方程中的时刻 t 直接用 $-t$ 替换并导致时间的方向逆转的数学变换[1]，是用于研究物理过程可逆性的最重要的数学工具。由于时间反演变换同时又导致物理过程的方向逆转，因此时间和物理过程两者常被认为是同一的，而且人们普遍认为(热力学)过程的不可逆导致时间的单向性[2]，换句话说“时间前进的方向就是气体分子变得越来越均匀，从而达到越来越高的熵的方向”[3]。据此推论，经典力学、电磁学等所描述的最基本物理过程的可逆性应导致时间的双向(或无向)性，而且人们在思考相关问题时都会在不知不觉中产生类似的观点[4]。那么这是否意味着时间既是单向的(至少在理论上)、又是双向的呢？美国物理学家布赖恩·格林在其著作中就提出过类似的问题，但并没有给出明确的答案[5]，说明目前采用的时间反演变换的概念及方法有值得商榷之处。我们的研究表明，产生这一问题的根源在于虽然时间反演变换是用于研究物理过程与其逆过程之间对称关系的重要方法，但其定义中并没有反映出物理过程的方向性。而正是在对时间反演变换定义中物理量变化的方向性进行了详细分析及补充说明的基础上，我们发现了在导致物理过程逆转的时间对称变

换中时间的方向没有发生逆转这一重要前提，同时还推论出在时间反演变换操作中物理过程与其逆过程的微分、导数以及常用算符之间的对称关系，并对几个重要物理方程的时间反演变换进行了讨论。结果表明，目前的时间反演变换操作定义虽然能得到正确结论，但操作方法是错误的，并且将时间的单向性归结为热力学过程的单向性的观点也是不正确的。

1　物理量及其微分、导数的时间反演变换

物理量是用于描述物体的属性或物体运动的状态及其变化过程的量。常见的物理量有动力学量、电磁学量等。一般情况下描述物体运动状态及其变化过程的物理量都会随时间发生变化，从而是时间 t 的函数，通常用函数关系 $Q=Q(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n, t)$ 描述。而物理量及其微分、导数的时间反演变换就是研究对随时间变化的物理量及其微分、导数进行时间反演变换的对称性规律，对进一步研究物理方程的时间反演变换具有重要意义。

1.1　物理量的时间反演变换的定义

来看一个与目前教材及学术中等效的物理量时间反演变换的定义：假定物理量 Q 随时间的变化过程用 $Q=Q(x_1, x_2, \cdots, x_n, t)$ 描述，其中 $x_i(i=1,2,3,\cdots,n)$ 分别为 n 维空间的空间坐标，t 为时间。令 $t \to t'=-t$，则操作 $Q(x_1, x_2, \cdots, x_n, t) \to Q'(x'_1, x'_2, \cdots, x'_n, t')=Q(x_1, x_2, \cdots, x_n, -t)$，即是对 $Q(x_1, x_2, \cdots, x_n, t)$ 所进行的时间反演变换，对物理量 Q 的时间反演变换也可以称做 T 变换（$T: t \to t'=-t$）。由于物理过程的时间反演变换会导致过程的逆转，从而成为研究原过程与其逆过程之间对称性的方法，因此，时间反演变换的操作定义必须能够反映任何物理过程所具有的随时间变化的方向性，而上述定义并没有反映出物理过程的方向性特征以及对物理量 Q 进行时间反演变换后所造成的 Q 的变化过程的逆转，很容易并且已经导致理解上的歧义，如将其理解为时间倒流变换（这是另外的课题，在此我们不作深入讨论）[6]，因此是有缺陷的，需在下面进行详细说明。为简化叙述，在下面的讨论中将对 Q 的时间反演变换得到的物理量 Q' 称做 Q 的时间反演物理量，简称反演物理量，而将对物理量 Q 的时间反演变换作为对 Q 所进行的、算符为 T 的运算，即 $TQ(x_1, x_2, \cdots, x_n, t)=Q'(x'_1, x'_2, \cdots, x'_n, t')=Q(x_1, x_2, \cdots, x_n, -t)$。另外，为论述的需要，我们给出物理过程 Q 的逆过程的定义：这是从物理过程 Q 的末态开始发生的、以与 Q 完全相反的顺序依次经过 Q 的所有中间态最终回到 Q 的初态的物理过程。而根据论述的需要，我们会交替使用 T 变换与 T 运算这两个具有相同意义的概念。

下面对物理量 Q 为时间的一元函数 $Q=Q(t)$ 这种最简单情况进行讨论。我们用坐标系上的曲线 $Q=Q(t)$ 表示物理量 Q 从时刻 t_0 到 t_1 这一时间间隔中随时间

t 的变化过程，$Q=Q(t)$ 的变化发生的方向如图 1 的①、②中箭头所示。曲线 $Q=Q(t)$ 上的点 $P(Q,t)$ 与 Q 在 t 时刻的值对应，点 $P_0(Q_0,t_0)$（即初态）及 $P_1(Q_1,t_1)$（即末态）分别与 Q 在时刻 t_0 及 t_1 时的值对应，$Q=Q(t)$ 的变化只能随时间从曲线上的点 $P_0(Q_0,t_0)$ 到 $P_1(Q_1,t_1)$ 的方向进行，相应的时间的方向从 t_0 指向 t_1（$t_1>t_0$）。然后，在坐标系中标出曲线 $Q=Q(t)$ 上的每一点 $P(Q,t)$ 关于 $t=0$（或坐标原点 $O(0,0)$）的对称点 $P'(Q',-t)$（或 $P''(Q'',-t)$），其中点 $P_0'(Q_0',-t_0)$（或 $P_0''(Q_0'',-t_0)$）和点 $P_1'(Q_1',-t_1)$（或 $P_1''(Q_1'',-t_1)$）分别为点 $P_0(Q_0,t_0)$ 和 $P_1(Q_1,t_1)$ 关于 $t=0$（或坐标原点 $O(0,0)$）的对称点。根据定义，由所有这些点 $P'(Q',-t)$（或 $P''(Q'',-t)$）构成的曲线所对应的物理量 $Q'=Q(-t)$（或 $Q''=Q(-t)$）就是对物理量 $Q=Q(t)$ 进行 T 运算得到的反演物理量。在图 1 的①中有 $Q'=Q(-t)=Q(t)$，对这种情况我们称 Q 对 T 运算具有偶性，此类物理量有：空间坐标 x，作用力 F，加速度 a，能量 E，电势 Φ，电场强度 E，电位移 D，电荷密度 ρ，电极化强度 P 等；在图 1 的②中有 $Q''=Q(-t)=-Q(t)$，对这种情况我们称 Q 对 T 运算具有奇性，此类物理量有：时刻 t，速度 V，动量 p，轨道和自旋角动量 L，电磁矢势 A，磁感应强度 B，磁场强度 H，电流密度 J，磁化强度 M，坡印廷矢量 S 等。由于时间反演变换导致物理过程的逆转，因此 $Q=Q(t)$ 的反演物理量总是用于表示 $Q=Q(t)$ 的变化的逆过程，但这种表述不是无条件的，要在图 1 中具体实现用 $Q=Q(t)$ 的反演物理量 $Q'=Q(-t)$（或 $Q''=Q(-t)$）表述 $Q=Q(t)$ 的逆过程，根据变化过程的逆过程的定义，$Q'=Q(-t)$（或 $Q''=Q(-t)$）的变化只能随时间从曲线上的点 $P'_1(Q_1',-t_1)$（或 $P''_1(Q_1'',-t_1)$）（即末态）到点 $P'_0(Q_0',-t_0)$（或 $P''_0(Q_0'',-t_0)$）（即初态）的方向，而非与之相反（用于表示对 $Q=Q(t)$ 所进行的另一种完全不同的时间对称变换——时间倒流变换）的方向进行。相应的，时间的方向则从 $-t_1$ 指向 $-t_0$（$-t_0>-t_1$），如图 1 中的箭头所示。可见，无论是物理量 $Q=Q(t)$ 还是用于表示其逆过程的反演物理量 $Q'=Q(-t)$（或 $Q''=Q(-t)$），两者的变化均发生在时间（从小到大）的正方向上（虽然后者发生在负的时间区域），而非通常理解的前者发生在正的、后者发生在负的时间方向上，即正向的时间是 Q 及其反演物理量 Q' 共有的。从而当 T 运算改变了物理过程的方向时，时间的方向则不会因此发生变化。正如物理学家魏格纳（*Wigner*）在量子力学中引进时间反演变换的概念时指出，时间反演变换不是时间的倒流变换，而是运动方向的倒转[7]，而物理学家布赖恩·格林在其著作中讨论时间反演变换的问题时也持有类似的观点，即时间反演变换“不是把时间反过来，时间仍然保持原样。我们的结论是，要想使一个物体的运动轨迹逆转，只要在其路径上任意一点上逆转其速度即可”[8]，但这些观点都只是直觉上的，并没有严格意义的论证。这就是关于 $t=0$（或坐标原点 $O(0,0)$）的对称变换为 T 变换所应具备的前提条件。显然，这一结论可以推广至 $Q=Q$

$(x_1, x_2, \cdots, x_n, t)$这种多元函数的情况。

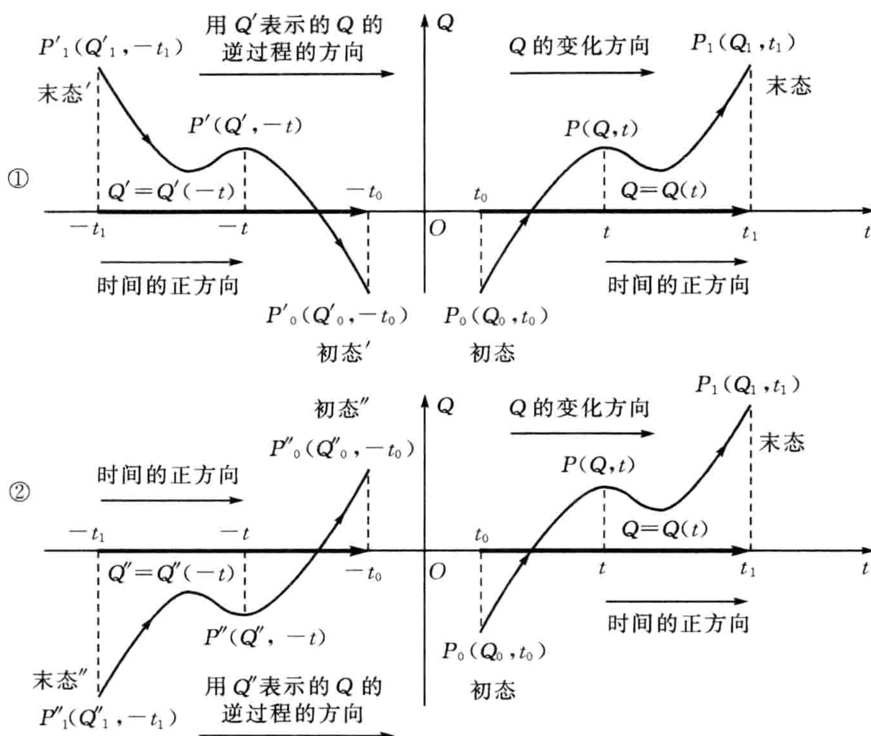


图 1　物理量 $Q=Q(t)$的 T 变换

1.2　物理量的微分、导数及其常用算符的时间反演变换

下面我们就借助关于时间反演变换新的定义内容对物理量的微分、导数及常用算符等进行详细讨论。

(1)物理量的 T 运算的微分及导数。假定物理量 Q 的变化过程如图 2 中曲线 $Q=Q(t)$所示，曲线 $Q=Q(t)$上的两点 $P(Q,t)$及 $P_1(Q_1,t_1)$分别表示 Q 在时刻 t 及 t_1时的对应值，令 $t_1=t+\Delta t$，则 Q 从时刻 t 到 t_1随时间产生的变化为

$$\Delta Q=Q(t_1)-Q(t)=Q(t+\Delta t)-Q(t)$$

令 $\Delta t\to 0_+$，则 $t_1=t+\Delta t\to t$，ΔQ 的右极限为

$$\lim_{\Delta t\to 0+}\Delta Q=\lim_{\Delta t\to 0+}(Q(t+\Delta t)-Q(t))=\mathrm{d}Q$$

而曲线 $Q=Q(t)$于时刻 t 在变化方向上的导数是 $\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t$，在此 $\mathrm{d}t>0$。假定物理量 Q 对 T 运算具有偶性，则对 Q 的 T 运算得到 Q 的反演物理量 $TQ(t)$如图中曲线

$Q'=Q(-t)$所示。显然，曲线$Q'=Q(-t)$上的两点$P'(Q',-t)$及$P_1'(Q_1',-t_1)$分别是曲线$Q=Q(t)$上的两点$P(Q,t)$及$P_1(Q_1,t_1)$关于$t=0$的对称点，并且曲线$Q'=Q(-t)$的变化从点$P_1'(Q_1',-t_1)$指向点$P'(Q',-t)$，以及$T(Q(t))=Q(-t)=Q(t)$。令$-t_1=-t-\Delta t$，则Q'从时刻$-t_1$到$-t$随时间产生的变化为

$$\Delta(TQ)=\Delta Q'=Q(-t)-Q(-t_1)=Q(-t)-Q(-t-\Delta t)$$

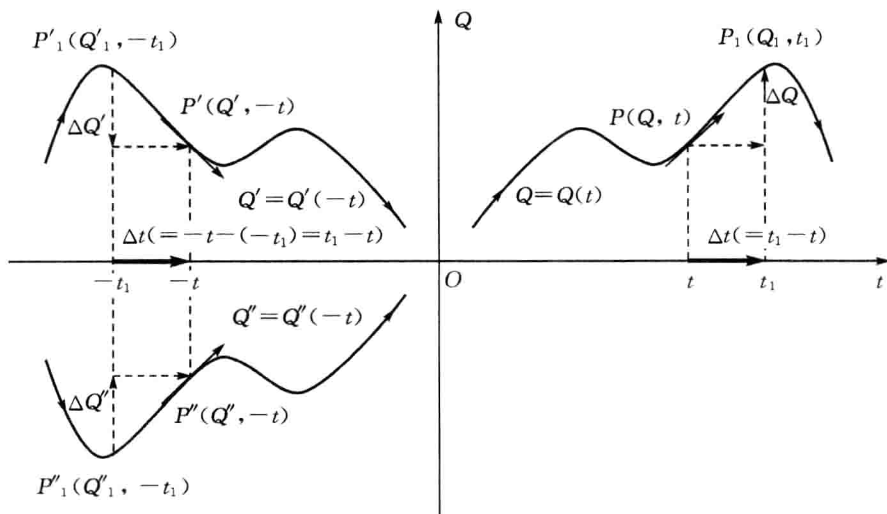


图 2　物理量$Q=Q(t)$的T变换的微分

令$\Delta t\to 0_+$，则$-t_1=-t-\Delta t\to -t$，$\Delta Q'$在时刻$-t$的左极限暨Q'的微分为

$$\begin{aligned} d(TQ(t)) &= dQ'(t) = \lim_{\Delta t\to 0+}\Delta Q' \\ &= \lim_{\Delta t\to 0+}(Q(-t)-Q(-t-\Delta t)) \\ &= \lim_{\Delta t\to 0+}(Q(t)-Q(t+\Delta t)) \\ &= -dQ(t) \end{aligned}$$

另外，曲线$Q'=Q(t)$在时间t的正方向上的导数是$dQ'/dt=-dQ/dt$，对T运算具有偶性的物理量Q的T运算的微分及导数分别为

$$d(TQ(t)) = dQ(t') =- dQ(t) \tag{1}$$

$$d(TQ(t)/dt) = dQ(t')/dt' =- dQ(t)/dt \tag{2}$$

而对T运算具有奇性的物理量Q的T运算得到的Q的反演物理量如图 2 中曲线$Q''=Q(-t)$所示，即有$T(Q(t))=Q(-t)=-Q(t)$，则Q的T运算的微分及导数分别为

$$d(TQ(t)) = dQ(t') = dQ(t) \tag{3}$$

$$d(TQ(t)/dt)=dQ(t')/dt'=dQ(t)/dt \tag{4}$$

特别的，由于时间 t 对 T 运算具有奇性，即 $Tt=t'=-t$，则有：$d(Tt)=dt'=dt\neq -dt$。上述结论显然可以推广至物理量 Q 是空间坐标 $x_i(i=1,2,3,\cdots,n)$ 及时间 t 的多元函数的情况。显然，物理量 Q 的微分和导数与其反演物理量 Q' 的微分和导数之间的这些关系正确反映了两者之间互为逆过程的特征。

根据上述结论并结合数学归纳法，还可以得到如下关于物理量 Q 的 $2n$ 阶导数的更一般的结论：假定物理量 $Q=Q(t)$ 对 T 运算具有偶性，即有 $TQ(t)=Q'(t')=Q(t)$，同时 Q 的 $2n$ 阶导数 $\frac{d^{2n}Q(t)}{dt^{2n}}(n=1,2,3,\cdots,k)$ 存在且不等于常数，则 $TQ(t)$ 的 $2n-1$ 及 $2n$ 阶导数分别为

$$\frac{d^{2n-1}TQ(t)}{dt^{2n-1}}=\frac{d^{2n-1}Q(t')}{d(t')^{2n-1}}=\frac{-d^{2n-1}Q(t)}{dt^{2n-1}}=-\frac{d^{2n-1}TQ(t)}{dt^{2n-1}} \tag{5}$$

及

$$\frac{d^{2n}TQ(t)}{dt^{2n}}=\frac{d^{2n}Q(t')}{d(t')^{2n}}=\frac{d^{2n}Q(t)}{dt^{2n}} \tag{6}$$

假定物理量 $Q=Q(t)$ 对 T 运算具有奇性，即有 $T(Q(t))=Q'(t')=-Q(t)$，同时 Q 的 $2n$ 阶导数 $\frac{d^{2n}Q(t)}{dt^{2n}}(n=1,2,3,\cdots,k)$ 存在且不等于常数，则 $TQ(t)$ 的 $2n-1$ 及 $2n$ 阶导数分别为

$$\frac{d^{2n-1}TQ(t)}{dt^{2n-1}}=\frac{d^{2n-1}Q(t')}{d(t')^{2n-1}}=\frac{d^{2n-1}Q(t)}{dt^{2n-1}} \tag{7}$$

及

$$\frac{d^{2n}TQ(t)}{dt^{2n}}=\frac{d^{2n}Q(t')}{d(t')^{2n}}=\frac{-d^{2n}Q(t)}{dt^{2n}}=-\frac{d^{2n}TQ(t)}{dt^{2n}} \tag{8}$$

这些结论同样可以推广至物理量 Q 为多元函数的情况。

(2)物理量的 T 运算的常用算符。假定物理量 $Q(x_1,x_2,x_3,t)$ 对 T 运算具有偶性(或奇性)，即 $TQ(x_1,x_2,x_3,t)=Q'(x'_1,x'_2,x'_3,t)=\pm Q(x_1,x_2,x_3,t)$，则

$$\begin{aligned}\frac{\partial TQ(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial x_i}&=\frac{\partial Q'(x'_1,x'_2,x'_3,t')}{\partial x'_i}\\&=\pm\frac{\partial Q(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial x_i}\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial TQ(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial t}&=\frac{\partial Q'(x'_1,x'_2,x'_3,t')}{\partial t'}\\&=\mu\frac{\partial Q(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial t}\end{aligned} \tag{10}$$

$$\frac{\partial T\ Q^2(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial x_m x_n}=\frac{\partial Q'^2(x'_1,x'_2,x'_3,t')}{\partial x'_m x'_n}$$

$$=\pm\frac{\partial Q^2(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial x_m x_n} \tag{11}$$

$$\frac{\partial \mathrm{T}\,Q^2(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial t^2}=\frac{\partial Q^2(x'_1,x'_2,x'_3,t')}{\partial t'^2}$$

$$=\pm\frac{\partial Q^2(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial t^2} \tag{12}$$

当 $m=n$ 时，有

$$\frac{\partial \mathrm{T}\,Q^2(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial x_i^2}=\frac{\partial Q^2(x'_1,x'_2,x'_3,t')}{\partial x'^2_i}$$

$$=\pm\frac{\partial Q^2(x_1,x_2,x_3,t)}{\partial x_i^2} \tag{13}$$

其中，$i,m,n=1,2,3$。由此可得

$$\nabla\cdot(TQ)=\nabla\cdot Q'=\pm\nabla\cdot Q \tag{14}$$

$$\nabla\times(TQ)=\nabla\times Q'=\pm\nabla\times Q \tag{15}$$

即对 T 运算具有偶性的物理量，其 T 运算的散度及旋度也具有偶性，而对 T 运算具有奇性的物理量，其 T 运算的散度及旋度也具有奇性。另外，我们还可以将上面的部分结论简化为偏微分算符的形式，有

$$T(\frac{\partial}{\partial x_i})=\frac{\partial}{\partial x'_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}$$

$$T(\frac{\partial}{\partial t})=\frac{\partial}{\partial t'}=-\frac{\partial}{\partial t}$$

$$T(\frac{\partial^2}{\partial x_m x_n})=\frac{\partial^2}{\partial x'_m x'_n}=\frac{\partial^2}{\partial x_m x_n}$$

$$T(\frac{\partial^2}{\partial t^2})=\frac{\partial^2}{\partial t'^2}=\frac{\partial^2}{\partial t^2}$$

当 $m=n$ 时，有

$$T(\frac{\partial^2}{\partial x_i^2})=\frac{\partial^2}{\partial x'^2_i}=\frac{\partial^2}{\partial x_i^2}$$

其中，$i,m,n=1,2,3$。这与量子力学教材中的相关结论是一致的。

通过上述讨论我们可以发现，对物理量的 T 运算的微分及导数不能简单地把其中的 t 用 $-t$ 替换，而必须同时考虑物理量对 T 运算的奇、偶性及时间的方向不因 T 运算而发生改变等因素，这与当前普遍采用的方法是完全不同的。

1.3 物理量的时间反演变换的性质

通过上面对物理量 Q 的 T 运算的微分及导数等的详细讨论，我们可以总结出如下关于物理量的 T 运算的一些重要性质，由于证明过程很简单，我们就不进行详细论证：

(1)对物理量 $Q_1, Q_2, \cdots, Q_n$ 的和的 T 运算等于分别对 $Q_1, Q_2, \cdots, Q_n$ 的 T 运算的和，即

$$T(Q_1 + Q_2 + \cdots + Q_n) = TQ_1 + TQ_2 + \cdots + TQ_n$$

(2)对物理量 $Q_1, Q_2, \cdots, Q_n$ 的积的 T 运算等于分别对 $Q_1, Q_2, \cdots, Q_n$ 的 T 运算的积，即

$$T(Q_1 \times Q_2 \times \cdots \times Q_n) = TQ_1 \times TQ_2 \times \cdots \times TQ_n$$

(3)对物理量 Q_1, Q_2 的商的 T 运算等于分别对 Q_1, Q_2 的 T 运算的商，即

$$T(Q_1/Q_2) = TQ_1/TQ_2$$

(4)对物理量 Q 的反演物理量的 T 运算为 Q，即

$$T(TQ) = Q$$

(5)对物理量 Q 的微分的 T 运算等于对 Q 的 T 运算的微分，即

$$T(\mathrm{d}Q) = \mathrm{d}(TQ)$$

(6)对物理量 Q 的导数(或偏导数)的 T 运算等于对 Q 的 T 运算的导数(或偏导数)，即

$$T(\mathrm{d}Q/\mathrm{d}t) = \mathrm{d}(TQ)/\mathrm{d}t$$

或

$$T(\partial Q/\partial t) = \partial(TQ)/\partial t$$

$$T(\partial Q/\partial x_i) = \partial(TQ)/\partial x_i$$

(7)对物理量 Q 的 n 阶导数(或对 t 的偏导数)的 T 运算等于对 Q 的 T 运算的 n 阶导数(或对 t 的偏导数)，即

$$T(\mathrm{d}^n Q/\mathrm{d}t^n) = \mathrm{d}^n(TQ)/\mathrm{d}t^n$$

或

$$T(\partial^n Q/\partial t^n) = \partial^n(TQ)/\partial t^n$$

$$T(\partial^n Q/\partial {x_i}^n) = \partial^n(TQ)/\partial {x_i}^n$$

2 物理方程的时间反演变换

物理方程是用于描述物理过程中不同物理量之间的数量关系及变化规律的方程，而物理方程的时间反演变换(即 T 运算)则是用于研究物理过程的可逆性或者相互关联的物理量之间综合对称性的数学方法，因此，对物理方程的 T 运算的研究具有重要意义。

2.1 物理方程的时间反演变换的定义

物理方程的时间反演变换(即 T 运算)的定义为：物理方程 $F(x_1, x_2, \cdots, x_{n-1}, x_n, t) = 0$ 的 T 运算是把该方程中涉及的每一个物理量及其微分都分别进行 T 运算，经过整理后所得到的新方程即是物理方程 $F(x_1, x_2, \cdots, x_{n-1}, x_n, t) = 0$ 的 T

运算形式。由此我们可以得到描述物理过程的方程的 T 运算不变性的定义：如果把描述某一物理过程的方程中涉及的每一个物理量及其微分等都分别进行 T 运算并经整理后得到的方程的数学形式与原方程完全相同，则我们说该物理方程具有 T 运算不变性。下面我们结合前面获得的结论对物理学中一些重要物理方程的 T 运算进行讨论。

2.2　经典力学中主要动力学方程的时间反演变换

由存在相互作用的质点构成的动力学体系除可以用牛顿动力学方程描述之外，还可以用哈密顿正则方程来描述：

$$\frac{\mathrm{d}q_i}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial H}{\partial p_i} \tag{16}$$

$$\frac{\mathrm{d}\,p_i}{\mathrm{d}t}=-\frac{\partial H}{\partial q_i} \tag{17}$$

式中，$i=1,2,3,\cdots,n$；q_i 为质点的广义坐标；p_i 为质点的广义动量；$H=\sum_i \frac{p_i^2}{2m_i}+U(q_1,\cdots,q_{3n})$ 为动力学系统的哈密顿量。

在方程(16)中$\frac{\mathrm{d}\,q_i}{\mathrm{d}t}$与$\frac{\partial H}{\partial p_i}$为广义速度，$\frac{\mathrm{d}p_i}{\mathrm{d}t}$与$\frac{\partial H}{\partial q_i}$为广义作用力，显然 $Tq_i=q_i{}'=q_i$，$Tp_i=p_i{}'=-p_i$，$TH=H'=H$，对方程进行 T 运算，则左边有

$$T(\frac{\mathrm{d}q_i}{\mathrm{d}t})=\frac{\mathrm{d}q'_i}{\mathrm{d}t'}=\frac{-\mathrm{d}q_i}{\mathrm{d}t}=-\frac{\mathrm{d}q_i}{\mathrm{d}t}$$

方程的右边有

$$T(\frac{\partial H}{\partial p_i})=\frac{\partial H'}{\partial p'_i}=\frac{-\partial H}{\partial p_i}=-\frac{\partial H}{\partial p_i}$$

所以方程(16)具有 T 运算不变性。

对方程(17)进行 T 运算，则方程的左边有

$$T(\frac{\mathrm{d}p_i}{\mathrm{d}t})=\frac{\mathrm{d}p'_i}{\mathrm{d}t'}=\frac{\mathrm{d}p_i}{\mathrm{d}t}$$

方程的右边有

$$T(-\frac{\partial H}{\partial q_i})=-\frac{\partial H'}{\partial q'_i}=-\frac{-\partial H}{-\partial q_i}=-\frac{\partial H}{\partial q_i}$$

所以方程(17)具有 T 运算不变性。

由存在相互作用的质点构成的动力学体系还可以用拉格朗日动力学方程描述：

$$\frac{\partial L}{\partial q_i}-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial(\mathrm{d}q_i/\mathrm{d}t)}\right)=0 \tag{18}$$

式中，$i=1,2,\cdots,n$；$L[q(t),\mathrm{d}q/\mathrm{d}t]=T(\mathrm{d}q_1/\mathrm{d}t,\cdots,\mathrm{d}q_{3n}/\mathrm{d}t)-V(q_1,\cdots,q_{3n})$是拉

格朗日函数。

显然，方程(18)中$\frac{\partial L}{\partial q_i}$为广义作用力；$\frac{\mathrm{d}\,q_i}{\mathrm{d}t}$为广义速度；$\mathrm{d}q_i$是广义位移；且 $TL=L'=L$，对其进行 T 运算，则方程的左边有

$$\begin{aligned}
&T\left(\frac{\partial L}{\partial q_i}-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial(\mathrm{d}q_i/\mathrm{d}t)}\right)\right)\\
&=\frac{\partial L'}{\partial q'_i}-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t'}\left(\frac{\partial L'}{\partial(\mathrm{d}q'_i/\mathrm{d}t')}\right)\\
&=\frac{-\partial L}{-\partial q_i}-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{-\partial L}{\partial[-\mathrm{d}q_i/\mathrm{d}t]}\right)\\
&=\frac{\partial L}{\partial q_i}-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial(\mathrm{d}q_i/\mathrm{d}t)}\right)
\end{aligned}$$

即方程(18)具有 T 运算不变性。也就是说用于描述存在相互作用的质点构成的动力学体系的经典力学方程具有时间反演变换不变性。

2.3 麦克斯韦电磁场方程及洛伦兹力的时间反演变换

电磁学理论体系主要由以下麦克斯韦方程组构成：

$$\nabla\cdot B=0 \tag{19}$$

$$\nabla\times E=-\frac{1}{C}\frac{\partial B}{\partial t} \tag{20}$$

$$\nabla\cdot E=4\pi\rho \tag{21}$$

$$\nabla\times B=\frac{1}{C}\frac{\partial E}{\partial t}+\frac{4\pi}{C}J \tag{22}$$

式中，$\nabla=\frac{\partial}{\partial x}i+\frac{\partial}{\partial y}j+\frac{\partial}{\partial z}k$ 为梯度算符；E 为电场强度；B 为磁感应强度；$J=\rho V$ 为电流密度；C 为光速。

而带电粒子在电磁场中的运动过程所受到的电磁力，即洛伦兹力作用的表达式为：

$$F=eE+\frac{e}{C}V\times H \tag{23}$$

式中，e 是带电粒子所带的电荷量；V 是带电粒子的运动速度；E 为带电粒子所处环境的电场强度；H 是带电粒子所处环境的磁场强度；C 为光速。

由于 $TE=E'=E$、$TB=B'=-B$、$T\rho=\rho'=\rho$，对方程(19)及(21)的 T 运算有

$$T(\nabla\cdot E)=\nabla'\cdot E'=\nabla\cdot E$$

$$T(\nabla\cdot B)=\nabla'\cdot B'=-\nabla\cdot B$$

其中$\nabla'=\frac{\partial}{\partial x'}i+\frac{\partial}{\partial y'}j+\frac{\partial}{\partial z'}k$，这样方程(19)及(21)具有 T 运算不变性；对方程

(20)的 T 运算,左边及右边分别有

$$T(\nabla \times E) = \nabla' \times E' = \nabla \times E$$

$$T(-\frac{1}{C}\frac{\partial B}{\partial t}) = -\frac{1}{C}\frac{\partial B'}{\partial t'} = -\frac{1}{C}\frac{\partial B}{\partial t}$$

对方程(22)的 T 运算,左边及右边分别有

$$T(\nabla \times B) = \nabla' \times B' = -\nabla \times B$$

$$T(\frac{1}{C}\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{4\pi}{C}J) = \frac{1}{C}\frac{\partial E'}{\partial t'} + \frac{4\pi}{C}J'$$

$$= \frac{1}{C}\frac{-\partial E}{\partial t} + \frac{4\pi}{C}(-J) = -\frac{1}{C}\frac{\partial E}{\partial t} - \frac{4\pi}{C}J$$

因此方程(20)及(22)也具有 T 运算不变性。综合上述结论可知,麦克斯韦方程组具有时间反演变换不变性。

另外,对方程(23) 右边的 T 运算有

$$T(eE + (eV/C) \times H) = e'E' + (e'V'/C') \times H'$$

$$= eE + (e(-V)/C) \times (-H)$$

$$= eE + (eV/C) \times H$$

即洛伦兹力也具有时间反演变换不变性。

2.4 描述微观物理过程的基本方程的时间反演变换

由于描述微观粒子运动规律的薛定谔方程是复函数形式的方程,因此无法直接利用前面获得的各种结论,为此我们采用汤甦野先生在其著作中提出的、与复函数形式的薛定谔方程完全等效的实函数形式的薛定谔方程组进行讨论:

$$\hbar\frac{\partial}{\partial t}A(r,t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + U(r)\right]B(r,t) \tag{24}$$

$$\hbar\frac{\partial}{\partial t}B(r,t) = -\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + U(r)\right]A(r,t) \tag{25}$$

其中 $A(r,t)=\mathrm{C}\cos[(\mathrm{pr}-\mathrm{Et})/\hbar]$ 及 $B(r,t)=\mathrm{C}\sin[(\mathrm{pr}-\mathrm{Et})/\hbar]$ 分别表示波函数 Ψ 的实部和虚部[10]。

对 $A(r,t)$ 的 T 运算有

$$T(A(r,t)) = A'(r',t') = A(r,-t) = \mathrm{C}\cos[(-pr - E(-t))/\hbar] = A(r,t)$$

即 $A(r,t)$ 对 T 运算具有偶性;

对 $B(r,t)$ 的 T 运算有

$$T(B(r,t)) = B'(r',t') = B(r,-t) = \mathrm{C}\sin[(-pr - E(-t))/\hbar] = -B(r,t)$$

即 $B(r,t)$ 对 T 运算具有奇性。

对方程(24)进行 T 运算,则方程的左边有

$$T(\hbar\frac{\partial}{\partial t}A(r,t)) = \hbar\frac{\partial}{\partial t'}A'(r',t') = -\hbar\frac{\partial}{\partial t}A(r,t)$$

方程的右边有

$$T\left(\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+U(r)\right]B(r,t)\right)=\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla'^2+U'(r')\right]B'(r',t')$$
$$=-\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+U(r)\right]B(r,t)$$

由此可得方程具有 T 运算不变性。

对方程(25)进行 T 运算，则方程的左边有

$$T\left(\hbar\frac{\partial}{\partial t}B(r,t)\right)=\hbar\frac{\partial}{\partial t'}B'(r',t')=\hbar\frac{\partial}{\partial t}B(r,t)$$

方程的右边有

$$T\left(\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+U(r)\right]A(r,t)\right)=\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla'^2+U'(r')\right]A'(r',t')$$
$$=\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+U(r)\right]A(r,t)$$

可见方程组具有 T 运算不变性。即与复函数形式的薛定谔方程完全等效的联立实函数方程具有时间反演变换不变性，从而复函数形式的薛定谔方程同样具有时间反演变换不变性。

在量子力学中波函数 Ψ 用于描述粒子在空间中的几率分布，而且多数量子力学的问题都可归结为对薛定谔方程中的波函数 Ψ 的求解；此外，还可以通过使用力学量算符与波函数 Ψ 进行运算的方法计算出相应力学量的各本征值的几率，可见，力学量算符在量子力学中是非常重要的概念。而为了便于对量子力学中各种力学量算符的 T 变换的研究，量子物理学家引入了与之对应的 T 变换算符 T，如在量子力学中对粒子的坐标、动量以及轨道角动量对应的算符 x、P、L 的 T 操作分别为 $x'=TxT^{-1}=x, P'=TPT^{-1}=-P, L'=TLT^{-1}=-L$ 等。其实在量子力学中 T 变换算符 T 完全是对量子系统中的力学量算符的 T 变换的整体性操作，其方法完全等同于直接将物理量中的 t 用 $-t$ 替换，因此是不正确的，由于篇幅限制我们就不进行更深入地讨论。

2.5 描述热力学系统变化过程的物理方程的时间反演变换

描述一维热导体传导过程的傅里叶偏微分方程为：

$$\frac{\partial T(X,t)}{\partial t}=-\lambda\frac{\partial^2 T(X,t)}{\partial X^2} \tag{26}$$

式中，函数 $T(X,t)$ 为热传导函数；λ 为热传导系数。

假定热传导函数 $T(X,t)$ 对 T 运算具有偶性，即 $T(T(X,t))=T'(X',t')=T(X,t)$，对方程(26)进行 T 运算，则方程的左边有

$$T\left(\frac{\partial T(X,t)}{\partial t}\right)=\frac{\partial T'(X',t')}{\partial t'}=\frac{-\partial T(X,t)}{\partial t}=-\frac{\partial T(X,t)}{\partial t}$$

另外，根据式(13)，则方程(26)的右边有

$$T(-\lambda\frac{\partial^2 T(X,t)}{\partial X^2})=-\lambda\frac{\partial^2 T'(X',t')}{\partial X'^2}=-\lambda\frac{\partial^2 T(X,t)}{\partial X^2}$$

显然，方程(26)的数学形式没有保持不变，因而其不具有 T 运算不变性。而如果假定热传导函数 $T(X,t)$ 对 T 运算具有奇性，同样可以证明方程(26)不具有 T 运算不变性。可见，对于任意的一维热导体的热传导函数 $T(X,t)$，其热传导过程的傅里叶方程不具有时间反演变换不变性，也即热传导过程具有不可逆性或单向性。由于 T 运算导致的热传导过程的逆过程与其原过程一样都是在时间的正方向上发生的，即 T 运算不会导致新的时间方向或“时间箭头”的产生，从而热传导过程的单向性与“时间箭头”无关；同样的，基本物理方程的 T 运算的不变性也不意味着时间的双向(或无向)性，更不像物理学家布赖恩·格林所说的“按时间轴正向发生的运动同样也可以逆着时间轴发生”。除了热传导过程之外，所有与热力学过程有关的过程都不具有 T 变换不变性，这就是热力学第二定律所揭示的内涵。由于涉及范围广，我们就不进行深入讨论。

3 更一般意义的时间反演变换

我们知道，T 变换是以 $t=0$ 为对称轴(或以 $O(0,0)$ 为对称点)将物理过程作对称变换，从而在数学上实现过程逆转的一种方法。实际上，还可以以 $t=t_0$ 为对称轴(或者以 $P(t_0,0)$ 为对称点)对描述物理量 $Q=Q(t)$ 变化过程的曲线进行对称变换，假定 t_0 是“现在”所对应的时刻。而新获得的曲线对应的物理量 $Q'(2t_0-t)$(或 $Q''(2t_0-t)$)同样是物理量 $Q(t)$ 的反演物理量，而且与用 T 变换得到的 $Q(t)$ 的反演物理量完全等效，由此获得的各种结论也完全相同(特别是物理量 $Q(t)$ 与其反演物理量的变化也都是在时间的正方向上发生的)，如图 3 或图 4 所示，对此我们就不进行深入讨论。在图 3 或图 4 中，如果令 $t_0=0$，则相应的对称变换即为 T 变换，即 T 变换是这里所说的物理量 $Q(t)$ 关于 $t=t_0$ 为对称轴(或者以 $P(t_0,0)$ 为对称点)的对称变换的特殊情况。另外，从图中可见，这里提到的关于时间的对称变换，既可以向“过去”的时间区域(如图 3 所示的情况中，$2t_0-t$ 是“过去”的时刻，因此是时间的“反演”变换)、也可以向“未来”的时间区域(如图 4 所示的情况中，$2t_0-t$ 是“未来”的时刻，我们可以称其为时间的“正演”变换)进行。可见，在数学上有不止一种方法可以实现物理过程的逆转，对研究物理过程与其逆过程之间的对称性关系而言，T 变换仅仅是其中一种简洁、常用的方法，这是一种完全等效于对物理过程录制的影像进行倒放的方法，只不过前者是用静态的、数学的研究方法，而后者则是动态的影像手段，从而只具有方法论意义而没有其他特殊的意义。

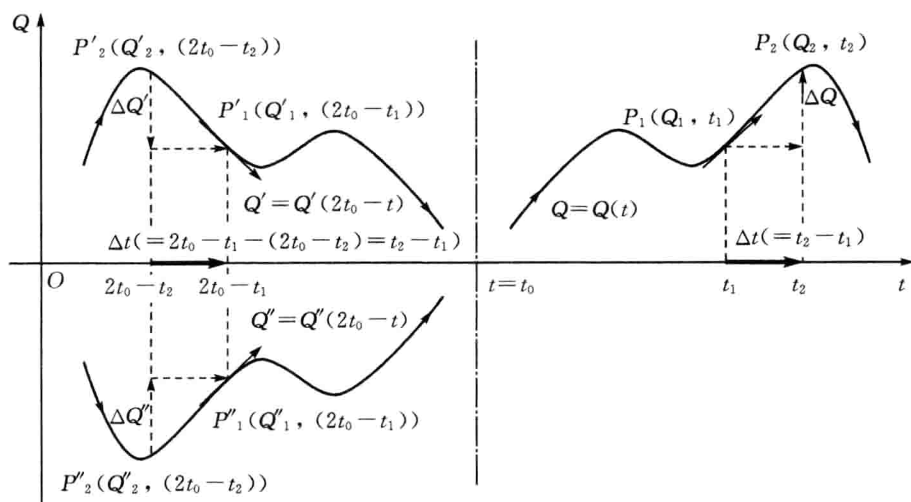


图 3　物理量 $Q=Q(t)$ 以 $t=t_0$ 为对称轴(或 $P(t_0,0)$ 为对称点)向"过去"的时间对称变换

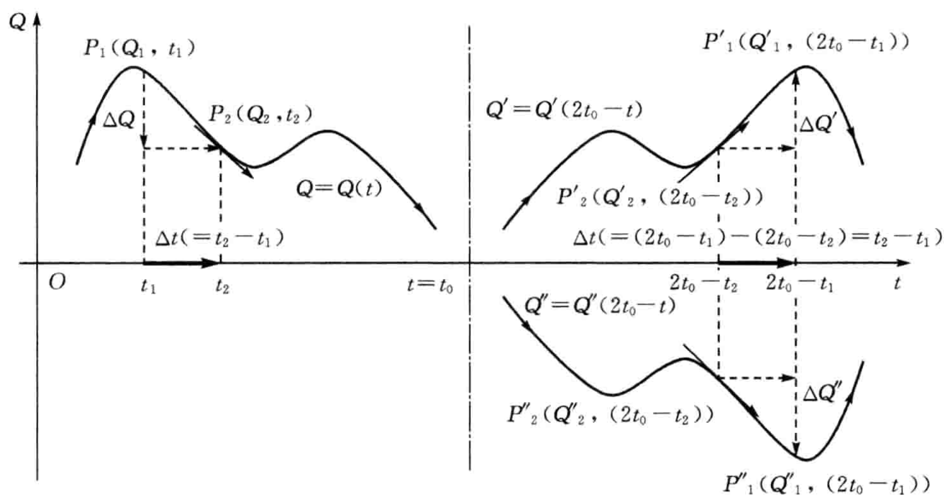


图 4　物理量 $Q=Q(t)$ 以 $t=t_0$ 为对称轴(或 $P(t_0,0)$ 为对称点)向"未来"的时间对称变换

4　结论

通过上面对物理量及物理方程的 T 变换(即 T 运算)的详细讨论，我们得到以下结论：

(1)由于物理量的变化过程与其逆过程都是在相同的时间方向上进行的，因此，在对物理量特别是物理量的微分或导数进行 T 运算时，不能简单的将其中的时间 t 用 $-t$ 替换。如对时间 t 进行 T 运算，则有

$$\mathrm{d}(Tt)=\mathrm{d}t'=\mathrm{d}t\neq-\mathrm{d}t。$$

(2)对 T 运算具有偶性的物理量 Q 的 T 运算的微分及导数仅仅导致物理量的微分及导数的符号发生改变。特别的，如果 Q 的 $2n$ 阶导数 $\frac{d^{2n}Q(t)}{d\,t^{2n}}$ $(n=1,2,3,\cdots,k)$ 存在且不等于常数，则有

$$\frac{\mathrm{d}^{2n-1}\mathrm{T}Q(t)}{\mathrm{d}\,t^{2n-1}}=\frac{\mathrm{d}^{2n-1}Q(t')}{\mathrm{d}(t')^{2n-1}}=-\frac{\mathrm{d}^{2n-1}Q(t)}{\mathrm{d}\,t^{2n-1}}$$

$$\frac{\mathrm{d}^{2n}\mathrm{T}Q(t)}{\mathrm{d}\,t^{2n}}=\frac{\mathrm{d}^{2n}Q(t')}{\mathrm{d}(t')^{2n}}=\frac{\mathrm{d}^{2n}Q(t)}{\mathrm{d}\,t^{2n}}$$

而对 T 运算具有奇性的物理量 Q 的 T 运算的微分及导数导致物理量的微分及导数保持不变。特别的，如果 Q 的 $2n$ 阶导数 $\frac{\mathrm{d}^{2n}Q(t)}{\mathrm{d}\,t^{2n}}$ $(n=1,2,3,\cdots,k)$ 存在且不等于常数，则有

$$\frac{\mathrm{d}^{2n-1}\mathrm{T}Q(t)}{\mathrm{d}\,t^{2n-1}}=\frac{\mathrm{d}^{2n-1}Q(t')}{\mathrm{d}(t')^{2n-1}}=\frac{\mathrm{d}^{2n-1}Q(t)}{\mathrm{d}\,t^{2n-1}}$$

$$\frac{\mathrm{d}^{2n}\mathrm{T}Q(t)}{\mathrm{d}\,t^{2n}}=\frac{\mathrm{d}^{2n}Q(t')}{\mathrm{d}(t')^{2n}}=-\frac{\mathrm{d}^{2n}Q(t)}{\mathrm{d}\,t^{2n}}$$

(3)描述最基本的物理过程的方程具有 T 运算不变性；描述热力学过程的方程是 T 运算对称破缺的。

(4)由于物理过程与其逆过程都在相同的时间方向上发生变化，因此基本物理过程的可逆性以及热力学过程的不可逆性(即单向性)均与时间的方向性无关，因此并非意味时间的双向性或单向性。

(5)T 运算是研究物理过程可逆性的一种数学工具，只具有方法意义而没有其他特殊意义。

参考文献

[1] 彼得·柯文尼，罗杰·海菲尔德，等. 时间之箭——解开时间最大奥秘之科学旅程[M]. 湖南：湖南科学技术出版社，1995：35.

[2] 冯端，冯少彤，等. 溯源探幽熵的世界[M]. 北京：科学出版社，2005：107.

[3] 布赖恩·格林. 宇宙的结构——空间、时间以及真实性的意义[M]. 湖南：湖南科学技术出版社，2012：169.

[4] 布赖恩·格林. 宇宙的结构——空间、时间以及真实性的意义[M]. 湖南：湖

南科学技术出版社，2012：170.
[5] 布赖恩·格林. 宇宙的结构——空间、时间以及真实性的意义[M]. 湖南：湖南科学技术出版社，2012：172.
[6] 郭应焕，郭振华，郭巍. 迟到131年的证明：普适时间反演不变性禁止任何可逆性[J]. 宇航学报，2010，33(2)：573－586.
[7] 刘希明. 高等量子力学[M]. 山东：山东科学技术出版社，2002：229－230.
[8] 布赖恩·格林. 宇宙的结构——空间、时间以及真实性的意义[M]. 湖南：湖南科学技术出版社，2012：159.
[9] 尹鸿钧. 量子力学[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，1999：455－455.
[10] 汤甦野. 熵：一个世纪之谜的解析[M]. 2版. 合肥：中国科学技术大学出版社，2008：177.
[11] 布赖恩·格林. 宇宙的结构——空间、时间以及真实性的意义[M]. 湖南：湖南科学技术出版社，2012：159.

Time inversion of physical quantity and physical equation —Solutions to the problem and the present system

Daqing Li

Abstract: Through detailed analysis of time reversal transformation definitions of physical quantities of the widely used the time symmetry transform, found the condition of time inversion, and get on with the generally accepted view different conclusion: time inversion only change the physical process of direction without changing the direction of time. Analysis conducted to define the content of the new time inversion for the time inversion of differential, on the basis of the derivative of a physical quantity and commonly used operator and an important conclusion. And accordingly the time inversion of physical equations are discussed, the one－way and arrow of time description of the most basic physical process equations with time reversal transformation invariance and thermodynamic processes not important conclusion obtained is discussed.

Key Words: Physical quantity, Physical equation, The physical process of direction, The direction of time, Time inversion

参考文献

[1]〔美〕B. 格林. 隐藏的现实[M]. 李剑龙，等，译. 北京：人民邮电出版社，2013.

[2]〔联邦德国〕H. 哈肯. 协同学——自然成功的奥秘[M]. 戴鸣钟，译. 上海：上海科学普及出版社，1988.

[3]〔比〕伊·普里戈金，〔法〕伊·斯唐热. 从混沌到有序[M]. 曾庆红，沈晓峰，译. 上海：上海译文出版社，1987。

[4]〔英〕约翰·格里宾. 宇宙传记[M]. 徐彬，等，译. 长沙：湖南科学技术出版社，2011.

[5]〔英〕伊恩·斯图尔特. 上帝掷骰子吗——混沌之数学[M]. 潘涛，译. 上海：上海远东出版社，1996.

[6]〔西德〕H. 哈肯. 协同学[M]. 徐锡申，等，译. 北京，原子能出版社，1984.

[7]〔法〕勒内·托姆. 突变论：思想和应用[M]. 周仲良，译. 上海：上海译文出版社，1989.

[8]〔美〕詹姆斯·格莱克. 混沌——开创新科学[M]. 张淑誉，译. 上海：上海译文出版社，1991.

[9]〔美〕斯图亚特·考夫曼. 宇宙为家[M]. 李绍明，等，译. 长沙：湖南科学技术出版社，2011.

[10]〔美〕R.. P. 费曼. 费曼讲物理：相对论[M]. 周国荣，译. 长沙：湖南科学技术出版社，2012.

[11]〔美〕杰拉德·埃德尔曼. 比天空更广阔[M]. 唐璐，译. 长沙：湖南科学技术出版社，2012.

[12]〔美〕梅拉妮·米歇尔. 复杂[M]. 唐璐，译. 长沙：湖南科学技术出版社，2012.

[13]〔比〕尼科里斯·普利高津. 探索复杂性[M]. 罗久里，等，译. 成都：四川教育出版社，1986.

[14]〔美〕埃里克·詹奇. 自组织的宇宙观[M]. 曾国屏，译. 北京：中国社会科学出版社，1992.

[15]〔英〕费比恩. 起源[M]. 王鸣阳，译. 北京：华夏出版社，2011.

[16]〔瑞士〕马克斯·皮卡德. 沉默的世界[M]. 李毅强，译. 上海：上海书店出版社，2013.

[17]〔法〕米歇尔·希翁. 声音[M]. 张艾弓，译. 北京：北京大学出版社，2013.

[18]〔美〕戴维·玻姆. 整体性与隐缠序——卷展中的宇宙与意识[M]. 洪定国，

译.上海:上海科技教育出版社,2013.
[19]〔美〕撒迦利亚.西琴.当时间开始[M].宋易,译.重庆:重庆出版社,2010.
[20]〔英〕乔治·斯坦纳.存在主义祖师爷——海德格尔[M].阳仁生,译.长沙:湖南人民出版社,1988.
[21]〔英〕迈克尔·英伍德.海德格尔[M].刘华文,译.南京:凤凰出版传媒股份有限公司译林出版社,2013.
[22]〔德〕维纳尔·马克思.海德格尔与传统——存在之基本规定的一个问题史式导论[M].朱松峰,等,译.上海:上海人民出版社,2012.
[23]〔美〕乔治·斯坦纳.海德格尔[M].李河,等,译.杭州,浙江大学出版社,2012.
[24]〔德〕马丁·海德格尔.存在与时间[M].陈嘉映,等,译.北京:生活·读书·新知三联书店出版社,1987.
[25]〔英〕罗伊·索伦森.悖论简史——哲学和心灵的迷宫[M].贾红雨,译.北京:北京大学出版社,2007.
[26]〔英〕路德维希·维特根斯坦.逻辑哲学论[M].王平复,译.北京:中国社会科学出版社,2009.
[27]〔美〕约翰·塞尔.意识的奥秘[M].刘叶涛,译.南京:南京大学出版社,2009.
[28]〔法〕雅克·德里达.声音与现象[M].杜小真,译.北京:商务印书馆,2010.
[29]〔英〕J.L.奥斯丁.感觉和可感物[M].陈嘉映,译.北京:商务印书馆,2010.
[30]〔奥〕马赫.感觉的分析[M].洪谦,等,译.北京:商务印书馆,1986.
[31]〔美〕帕特里克·苏佩斯.科学结构的表征与不变性[M].成素梅,译.上海:上海译文出版社,2011.
[32]〔美〕达德利·夏佩尔.理由与求知[M].褚平,等,译.上海:上海译文出版社,2006.
[33]〔美〕亚历克斯·罗森堡.科学哲学——当代进阶教程[M].刘华杰,译.上海:上海科学教育出版社,2004.
[34]〔美〕F.卡普拉.物理学之“道”——近代物理学与东方神秘主义[M].朱润生,译.北京:北京出版社,1999.
[35]〔美〕刘易斯·托马斯.细胞生命的礼赞——一个生物观察者的手记[M].李绍明,译.长沙:湖南科学技术出版社,1995.
[36]〔美〕刘易斯·托马斯.水母与蜗牛——一个生物观察者的手记[M].李绍明,译.长沙:湖南科学技术出版社,1996.
[37]〔美〕M.盖尔曼.夸克与美洲豹[M].杨建邺,译.长沙:湖南科学技术出版社,1997.

[38]〔英〕斯蒂芬·霍金. 时空本性[M]. 杜欣欣,等,译. 长沙:湖南科学技术出版社,1996.
[39]〔英〕怀特海. 过程与实在[M]. 李步楼,译. 北京:商务印书馆,2011.
[40]〔法〕昂利·柏格森. 创造进化论[M]. 肖聿,译. 北京:华夏出版社,2000.
[41]〔法〕彭加勒. 科学的价值[M]. 李醒民,译. 北京:光明日报出版社,1988.
[42]〔英〕弗兰克斯·彭茨,格雷格里·雷迪克,罗伯特·豪厄尔. 空间[M]. 马光亭,等,译. 北京:华夏出版社,1988.
[43]〔奥〕埃尔温·薛定谔. 自然与古希腊[M]. 颜锋,译. 上海:上海科学技术出版社,2002.
[44]〔法〕雅克·马里丹. 存在与存在者[M]. 龚同铮,译. 贵阳:贵州人民出版社,1990.
[45]〔德〕卡尔·雅斯贝尔斯. 智慧之路[M]. 柯锦华,等,译. 北京:中国国际广播出版社,1988.
[46]〔法〕萨特. 影像论[M]. 魏金声,译. 北京:中国人民大学出版社,1986.
[47]〔英〕詹姆斯. W. 麦卡里斯特. 美与科学革命[M]. 李为,译. 长春:吉林人民出版社,2000.
[48]〔美〕N. 施皮尔伯格,B. D. 安德森. 震撼宇宙的七大思想[M]. 张祖林,等,译. 北京:科学出版社,1992.
[49]〔法〕皮埃尔·西蒙·拉普拉斯. 宇宙体系论[M]. 李珩,译. 北京:商务印书馆,2012.
[50]〔德〕马丁·海德格尔. 哲学论稿(从本有而来)[M]. 孙周兴,译. 北京:商务印书馆,2012.
[51]〔英〕史蒂芬·霍金. 大设计[M]. 吴忠超,译. 长沙:湖南科学技术出版社,2011.
[52]〔美〕约翰·巴罗,保罗. C. W. 戴维斯,小查理斯. 哈勃. 宇宙极问——量子,信息和宇宙[M]. 朱芸慧,等,译. 长沙:湖南科学技术出版社,2009.
[53]〔英〕史蒂芬·霍金. 时空的未来[M]. 李泳,译. 长沙:湖南科学技术出版社,2007.
[54]〔美〕阿·热. 可怕的对称[M]. 荀坤,等,译. 长沙:湖南科学技术出版社,1992.
[55]〔英〕保罗·戴维斯. 上帝与新物理学[M]. 徐培,译. 长沙:湖南科学技术出版社,1992.
[56]〔英〕罗杰·彭罗斯. 皇帝新脑[M]. 许明贤,等,译. 长沙:湖南科学技术出版社,1995.

[57]〔英〕约翰·格里宾. 大爆炸[M]. 卢炬甫,译. 上海:上海科技教育出版社,2000.

[58]〔美〕约翰·施塔赫尔. 爱因斯坦奇迹年——改变物理学面貌的五篇论文[M]. 范岱年,等,译. 上海:上海科技教育出版社,2001.

[59] 张荣. 自由,心灵与时间——奥古斯丁心灵转向问题的文本学研究[M]. 南京:江苏人民出版社,2011.

[60] 张祥龙. 海德格尔思想与中国天道[M]. 北京:中国人民大学出版社,2011.

[61] 黄淑清,聂宜如,申先甲. 热学教程[M]. 南京:高等教育出版社,1990.

[62] 苏汝铿. 统计物理学[M]. 上海:复旦大学出版社,1990.

[63] 苗东升,刘华杰. 混沌学纵横论[M]. 北京:中国人民大学出版社,1994.

[64] 沈小峰,吴彤,曾国屏. 自组织的哲学——一种新的自然观和科学观[M]. 北京:中共中央党校出版社,1993.

[65] 姜璐,王德胜,等. 系统科学新论[M]. 北京:华夏出版社,1990.

[66] 沈小峰,胡岗,姜璐. 耗散结构论[M]. 上海:上海人民出版社,1987.

[67] 梁美灵,王则柯. 童心与发现——混沌与均衡纵横谈[M]. 北京:生活·读书·新知三联书店,1996.

[68] 张天融. 蝴蝶效应之谜——走进分形与混沌[M]. 北京:清华大学出版社,2013.

[69] 王正行. 量子力学原理[M]. 北京:北京大学出版社,2003.

[70] 王顺金. 物理学前沿——问题与基础[M]. 北京:科学出版社,2013.

[71] 俞允强. 热大爆炸宇宙学[M]. 北京:北京大学出版社,2001.

[72] 刘佑昌. 狭义相对论及其佯谬[M]. 北京:清华大学出版社,2011.

[73]〔奥〕W. 泡利. 相对论[M]. 凌德洪,译. 上海:上海科学技术出版社,1984.

[74] 蔡立. 相对论探疑[M]. 上海:上海交通大学出版社,2013.

[75]〔英〕理查德·道金斯. 地球上最伟大的表演——进化的证据[M]. 李虎,等,译. 北京:中信出版社,2013.

[76]〔德〕雅斯贝尔斯. 当代的精神处境[M]. 黄藿,译. 北京:生活·读书·新知三联书店,1992.

[77]〔英〕罗杰·彭罗斯. 通向实在之路——宇宙法则的完全指南[M]. 王文浩,译. 长沙:湖南科学技术出版社,2013.

[78] 卢昌海. 从奇点到虫洞——广义相对论专题选讲[M]. 北京:清华大学出版社,2013.

[79] 张操. 物理时空理论探讨——超越相对论的尝试[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,2011.

后　记

我曾经阅读过许多关于时间或与时间有关的文章及书籍，原本想以此能够对时间的本质问题有更加清晰的理解，但读后往往更加疑惑，更加不知时间究竟为何物，当时的心境完全如圣·奥古斯丁那段流传千年、对时间的理解万般无奈的表白。不过虽然有疑惑，但毕竟读后每每都会有所收获。经日积月累，对时间的认识渐渐清晰起来，所以打算将这些认识整理成书，但总觉得没有一条清晰的线条将这些认识串起来形成对时间系统的观点。

后来觉得将一切物质的变化过程都具有时间性作为主线比较合适，但爱因斯坦的相对论中关于时间膨胀及弯曲的观点成为最大的障碍，这一观点的一个推论是当物体运动的速度无线接近光速，或者四维黎曼时—空在巨大的物质质量——黑洞——周围极度弯曲最终形成黑洞时，时间则会相对停止，因此，一切物质的变化过程都具有时间性这一观点就可能站不住脚。后来，我经过长期的思考发现，由于我们借助时钟测量的并不直接就是时间，因此将相对论中的时钟变慢公式直接解读为时间变慢或膨胀、弯曲的观点是有问题的，特别是由于时钟仅仅是测量而非显示时间的工具，因此相对论中的所谓时间的膨胀或弯曲的结论仅仅是测量意义上的，只具有方法论意义而没有本体论意义，实际上时间本身并没有也不可能因物体的运动或物质的质量而发生任何变化，这一观点显然与当前物理学中流行的观念是不同的，同时也证明被几乎所有物理学家推崇为最完美理论——相对论——是有瑕疵的。对此，我感觉自己就像安徒生童话故事《皇帝的新衣》中发现被众人赞美穿着美丽新衣的皇帝，实际上根本没有穿任何服装的那个男孩一样。正是在这一发现的基础上，我感觉将一切物质的变化过程都具有时间性这一观点作为讨论时间问题的出发点是再合适不过的。但是，一切物质的变化过程都具有时间性这一观点与时间具有方向性及流逝性之间同样存在潜在的矛盾，我经过深入思考发现物理学教材中通常采用的时间反演变换的操作性定义是不正确的，而且其中包含了时间反演变换与时间倒流变换两种关于时间的对称变换，物理学中通常所说的方向性实际上是物质的变化过程而非时间所具有的性质。至此，所有关于时间的性质基本清晰地呈现出来，整本书的脉络也就顺理成章。由于本书对当前科学及哲学界关于时间的一些最重要的问题都进行了系统地思考，因此我自觉应该对时间的本质问题有了一个相对清晰的理解。

当然，人们也许还能够提出本书无法概括的、其他关于时间的更深刻的问题来否定我提出的观点，而这也正是本书的目的所在——对常识的观念、对奉为经典却

似是而非的观点进行合理的质疑,这才是人类文明不断发展、持续进步的最大原动力。正如著名的意大利物理学家卡尔罗·罗威利所说:"也许二十世纪最大的科学发现就是科学'会出错'。即从准确、可验证的角度来说,科学研究对世界的认识可能是错误的……我们能够发现科学认识世界的局限性,恰好说明了科学思维的力量所在。这种力量不是源于'经验',也不是出自'数学'或某种'方法',而是来自于科学本身的不断自我反省的能力。这就是对肯定自我的怀疑,勇于否认自己相信的东西,即使是非常确定的东西。科学的精髓就是发展变化……科学是变化的,它不断发展,总是停顿于知识与疑惑之间,永远在探索而非愚蠢地满足于得到的结论,它与十九世纪的科学留给我们的形象截然不同……因此,令我真正感兴趣的,不是科学对世界的诠释,而是这种诠释不断发展;不是科学的奇妙的发现,而是科学奇妙的思考方式,它能够对自身的结论提出质疑,并教会我们今后不断去改变认识世界的方法①。"

正因为任何科学理论都可能会出错,因此我们在对任何科学的结论进行思考时,必须始终持存质疑的心态,只有这样,科学理论才能不断发展、永葆活力。实际上,科学史上所有重要的科学进展都源自于对旧的理论体系的质疑。可以说,如果没有伽利略当年对两千多年的西方文明奉为圭臬的亚里士多德及其《物理学》中关于物体运动的经典理论的质疑,就不可能有对物体的运动规律精确的数学描述以及近代运动学的产生,更不可能有后来建立在伽利略运动学基础之上的牛顿力学大厦的建立;同样的,如果没有名不见经传的爱因斯坦当年对建立在严格的科学实验基础上的牛顿力学理论体系的质疑,就不可能有作为现代科学技术基础之一的相对论的创立。

我疑故我在,对常识的观念、对科学及哲学权威含混不清的观点的合理质疑是每一个追求人类知识进步的人士存在的最大意义;我思故我在,对问题的思考能力不是科学家、哲学家独有的技能,而是人类这一物种在与其他动物生存竞争过程中最重要的收获,从而也是我们星球上每一个人类个体的秉性,是我们生存的终极原动力。我们所有的知识应该是全人类共同的财富,每一个人类个体都有学习人类所积累的知识的义务,同时也有更新陈旧知识的职责,让每一个酷爱知识的人放飞梦想,大胆地去质疑、去思考,从而实现其人生价值吧。

作者于无锡

2014年3月7日

① [意]卡尔罗·罗威利.假如时间不存在?——讲点颠覆常理的科学[M].李润,译.北京:化学工业出版社,2013:52—54.

后记